



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**  
**Programa de Pós-Graduação em Construção Civil**

**ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DOSAGEM  
PARA CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA COM O  
USO DE MATERIAIS DISPONÍVEIS NA REGIÃO  
METROPOLITANA DE CURITIBA**

Prof. Dr. Kleber Franke Portella  
Orientador

Prof. Msc. José Marques Filho  
Co-orientador

Eng. Msc. Sandro Eduardo da Silveira Mendes  
Co-orientador

José de Almendra Freitas Jr.  
Mestrando

Curitiba, maio de 2005

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**José de Almendra Freitas Jr.**

### **ESTUDO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE DOSAGEM PARA CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA COM O USO DE MATERIAIS DISPONÍVEIS NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA**

Dissertação aprovada como requisito para obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

Orientador: Prof. Dr. Kleber Franke Portella  
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC

Prof. Dr. Vladimir Paulon  
Setor de Engenharia Civil, UNICAMP

Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer  
Escola de Engenharia Civil, UFG

Prof. Dr. Marcos Marino  
Departamento de Construção civil, UFPR

Co-orientador: Prof. José Marques Filho, Msc.  
Departamento de Construção civil, UFPR

Co-orientador: Sandro Eduardo da Silveira Mendes, Msc.  
Eng. Civil

Curitiba, 30 de junho de 2005.

## DEDICATÓRIA

*À minha esposa Cinthia, aos meus filhos Jessica e José e aos meus pais, pessoas que sempre me ajudaram e me incentivaram ao estudo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço especialmente aos meus grandes amigos e orientadores, professores Kleber Portella, José Marques Filho, Moacir Inoue e Sandro Mendes pela amizade, tempo e paciência dispensados, sem os quais o desenvolvimento deste trabalho teria sido impossível.

Aos amigos com quem trabalho na Construtora Santa Tecla, em especial ao Cláudio Moreira e ao Italo Amaral, pela compreensão quanto a minha indisponibilidade durante alguns momentos do mestrado.

Agradeço, também, às empresas que forneceram os materiais e informações necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa, nas pessoas do Sr. Carlos Gustavo Marcondes - Cia de Cimento Itambé, ao Sr. Paulo Santos – Degussa/ MBT, Sr. Mario Roberto – Pedreiras Basalto, Sr. Celso - Areal Costa, Sr. Erivan – Impermix, Sr. Fábio – Engemix, Eng. Jorge Luis Christófolli – Concrebras.

Sou grato também aos professores Berenice Toralles Carbonari (UEL) e Prof. Rui Cremonini (UFRGS) pelo envio, através do Prof. José Marques Filho, dos documentos necessários ao desenvolvimento dos seus métodos de dosagem, e, também para a empresa Irmãos Thá S/A pelas informações sobre o Evolution Towers.

Sou igualmente grato ao pessoal do LAME/LACTEC, por me disponibilizar o local para os ensaios experimentais, assim como por despender seu tempo com este trabalho, especialmente nas figuras do prof. Paulo Chamecki e dos laboratoristas João Luis Alves, Marcelo e Amauri.

## SUMÁRIO

	<b>DEDICATÓRIA.....</b>	i
	<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	ii
	<b>SUMÁRIO.....</b>	iii
	<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	v
	<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	vii
	<b>LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....</b>	ix
	<b>RESUMO.....</b>	x
	<b>ABSTRACT.....</b>	xi
1.	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	12
1.1	IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....	12
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	16
1.3	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	16
1.4	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	18
2.	<b>CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA.....</b>	20
2.1	HISTÓRICO E PRINCIPAIS APLICAÇÕES.....	20
2.2	DEFINIÇÕES.....	24
2.3	VANTAGENS E ÁREAS DE APLICAÇÃO.....	26
2.4	CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS SOBRE O USO DOS CAD (CAR) EM ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS .....	28
2.5	ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE CAR E CAD.....	29
3.	<b>A MICROESTRUTURA E OS MATERIAS NO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA (CAR) .....</b>	32
3.1	A FASE AGREGADO.....	32
3.2	A FASE PASTA MATRIZ.....	33
3.3	A FASE ZONA DE TRANSIÇÃO.....	35
3.4	MATERIAIS CONSTITUINTES.....	37
3.4.1	CIMENTO.....	37
3.4.2	AGREGADOS.....	39
3.4.2.1	AGREGADOS MIÚDOS.....	39
3.4.2.2	AGREGADOS GRAÚDOS.....	39
3.5	ADIÇÕES MINERAIS.....	41
3.5.1	SÍLICA ATIVA.....	42
3.5.2	CINZAS VOLANTES.....	43
3.6	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	45
3.6.1	COMPATIBILIDADE CIMENTO-ADITIVO.....	46
3.7	ÁGUA DE AMASSAMENTO.....	48
4.	<b>PRODUÇÃO, CONTROLE DE QUALIDADE E PROPRIEDADES DOS CAR.....</b>	49
4.1	PRODUÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE.....	49
4.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	50
4.2.1	PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO.....	50
4.2.1.1	TRABALHABILIDADE.....	51
4.2.1.2	AR INCORPORADO.....	51
4.2.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO.....	52
4.2.2.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	52
4.2.2.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	54
4.2.2.3	RETRAÇÃO E FLUÊNCIA.....	56
5.	<b>METODOLOGIA.....</b>	58

5.1	MATERIAIS UTILIZADOS NO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	58
5.1.1	CIMENTO.....	58
5.1.2	AGREGADOS.....	60
5.1.3	ADIÇÕES MINERAIS.....	61
5.1.3.1	SÍLICA ATIVA.....	61
5.1.4	ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE.....	61
5.2	OS MÉTODOS DE DOSAGEM .....	62
5.2.1	MÉTODOS DE DOSAGEM USADOS NO TRABALHO.....	63
5.2.1.1	APLICAÇÃO DO MÉTODO MEHTA/AİTCIN.....	64
5.2.1.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO AİTCIN.....	67
5.2.1.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO IPT/EPUSP MODIFICADO.....	71
5.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS DE DOSAGEM.....	73
5.3.1	DOSAGENS DOS CONCRETOS.....	77
5.3.2	PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA.....	79
5.3.3	ENSAIOS DE RUPTURA.....	81
6.	RESULTADOS DA PESQUISA.....	82
6.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS PREPARATÓRIOS.....	82
6.1.1	ENSAIOS SOBRE OS AGREGADOS.....	82
6.1.2	VERIFICAÇÃO DA COMPATIBILIDADE CIMENTO-ADITIVO.....	85
6.2	RESULTADOS OBTIDOS COM OS CONCRETOS PRODUZIDOS....	86
6.2.1	RESULTADOS DO MÉTODO MEHTA-AİTCIN.....	86
6.2.2	RESULTADOS DO MÉTODO AİTCIN.....	88
6.2.3	RESULTADOS DO MÉTODO IPT/EPUSP MODIFICADO.....	90
6.3	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	92
6.3.1	ANÁLISE DOS DESVIOS PADRÃO E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO.....	92
6.3.2	ANÁLISE DAS CURVAS DE AJUSTE.....	94
6.3.3	ANÁLISE DOS VALORES POTENCIAIS.....	95
6.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS MÉTODOS DE DOSAGEM.....	97
6.4.1	ANÁLISE QUANTO AOS CUSTOS DOS CONCRETOS.....	98
6.4.2	ANÁLISE QUANTO AOS CONSUMOS DE CIMENTO.....	105
6.5	ESTUDO COMPARATIVO DA APLICAÇÃO DE CAR NO CASO DO EVOUTION TOWERS.....	108
6.5.1	DESCRIÇÃO DAS FUNDAÇÕES E DA ESTRUTURA.....	110
6.5.2	COMPARATIVO DAS ALTERNATIVAS.....	114
6.5.2.1	DESCRIÇÃO DAS ALTERNATIVAS ANALISADAS.....	114
6.5.2.2	COMPARATIVO DOS CUSTOS DAS ALTERNATIVAS.....	117
6.5.3	CONCLUSÕES DO ESTUDO DE CASO.....	120
7.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	122
7.1	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	122
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	124

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Exemplo de aplicação do CAR em estruturas de edifícios altos: Petronas Towers (Partner of the World - Germany, 1997).....	13
Figura 1.2.	Exemplo de aplicação de CAR em Curitiba - Museu Oscar Niemeyer. (ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO, nº 78).....	14
Figura 2.1.	Ed. que compõe o atual Museu Oscar Niemeyer – Curitiba - Pr, construído em 1968 usando concretos com $f_{ck}$ de 40 MPa. Fonte: TESC – Projetos Estruturais S.C.....	21
Figura 2.2.	Ed. e-Tower, São Paulo, em 8/2004, (HARTMAN e HELENE, 2004).....	24
Figura 3.1.	Dimensões dos sólidos e vazios da pasta endurecida em escala logarítmica, (MEHTA & MONTEIRO, 1994).....	34
Figura 3.2.	A exsudação interna e a externa. (MEHTA & MONTEIRO, 1994).....	36
Figura 3.3.	Os diferentes cristais e suas concentrações em torno dos grãos dos agregados graúdos, (MEHTA & MONTEIRO, 1994).....	36
Figura 4.1.	Gráfico com a equação sugerida pelo ACI 363 R-92 (2001) e os resultados obtidos por várias pesquisas e faixas de resistências.....	55
Figura 4.2.	Correlações dos $E_{cs}$ com os $f_{ck}$ (ROJAS e PINTO, 2004).....	56
Figura 5.1.	Areia utilizada na pesquisa.....	60
Figura 5.2.	Brita nº1 utilizada na pesquisa. ....	60
Figura 5.3.	Relações propostas entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão, (AİTCIN, 2000).....	68
Figura 5.4.	Ábaco para a determinação da dosagem de água, (AİTCIN, 2000).....	69
Figura 5.5.	Ábaco para a determinação do teor de agregado graúdo, (AİTCIN, 2000).....	69
Figura 5.6.	Betoneira utilizada nas dosagens.....	76
Figura 5.7.	CPs recém moldados protegidos por uma película plástica.....	76
Figura 5.8.	Máquina cortando um CP da pesquisa.....	79
Figura 5.9.	Aspecto do topo de um CP após o corte na máquina.....	80
Figura 5.10.	CPs em procedimento de capeamento com enxofre.....	80
Figura 5.11.	Prensa EMIC utilizada para as rupturas.....	81
Figura 6.1.	Curva granulométrica do agregado miúdo, fonte LAME/LACTEC.....	83
Figura 6.2.	Curva granulométrica do agregado graúdo, fonte LAME/LACTEC.....	84
Figura 6.3.	Equipamento para o ensaio de fluidez.....	85
Figura 6.4.	O ponto de saturação do aditivo utilizado na pesquisa, fonte LAME/LACTEC. ....	86
Figura 6.5.	Correlações $f_c$ x relação A/A para o método <i>Mehta/Aİtcin</i> .....	88
Figura 6.6.	Correlações $f_c$ x relação A/A para o método <i>Aİtcin</i> .....	90
Figura 6.7.	Correlações $f_c$ x relação A/A para o método <i>IPT/EPUSP modificado</i> .....	92
Figura 6.8.	Evolução dos valores potenciais do método <i>Mehta/Aİtcin</i> .....	96
Figura 6.9.	Evolução dos valores potenciais do método <i>Aİtcin</i> .....	96
Figura 6.10.	Evolução dos valores potenciais do método <i>IPT/EPUSP modificado</i> .....	97

Figura 6.11.	Custos dos concretos pelas resistências aos 28 dias.....	101
Figura 6.12.	Custos dos concretos pelas resistências aos 7 dias.....	102
Figura 6.13.	Custos dos concretos pelas resistências aos 3 dias.....	102
Figura 6.14	Porcentagens dos custos dos materiais para as dosagens do método Mehta/Aïtcin.....	103
Figura 6.15	Resultados desta pesquisa em conjunto com os de MENDES (2002).....	105
Figura 6.16.	Consumos de cimento pelas resistências à compressão aos 28 dias.....	106
Figura 6.17.	Consumos de cimento pelas resistências à compressão aos 3 dias..	107
Figura 6.18.	Conjunto arquitetônico Evolution Towers. Fonte. Irmãos Thá S/A.....	109
Figura 6.19.	Corte e planta do Evolution Towers, com 46.210m <sup>2</sup> de área. A torre mais alta tem 37 pavimentos e 132 m de altura. Fonte Irmãos Thá S/A.....	109
Figura 6.20.	Fachada principal do Ed. Corporativo.....	110
Figura 6.21.	Concretagem da camada em C-60 de um bloco ao lado de outro, sob procedimento de cura. Fonte: CONCREBRAS, Eng. Jorge Christófolli. ....	111
Figura 6.22.	Planta do edifício Corporativo. Fonte: Tesc Projetos Estruturais S/C Ltda. ....	112
Figura 6.23.	Pavimento tipo do Corporativo, mostrando as lajes nervuradas e as esperas dos pilares em CAR. Fonte: Eng. Moacir Hissayassu Inoue. ....	112
Figura 6.24.	Visão da estrutura do Corporativo com pilares em CAR. Fonte: Eng. Moacir Hissayassu Inoue.....	113
Figura 6.25.	Estrutura do Corporativo, sendo bem visível a junção do CAR com o concreto convencional. Fonte: Eng. Moacir Hissayassu Inoue. ....	113



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Edifícios executados com CAR. Fonte: DAL MOLIN <i>et al.</i> (1997). .....	23
Tabela 5.1.	Características físicas do cimento CP V-ARI utilizado. (Fonte: Fabricante) .....	59
Tabela 5.2.	Características químicas do cimento CP V-ARI utilizado. (Fonte: Fabricante). .....	59
Tabela 5.3.	Características da sílica ativa utilizada. (Fonte: Fabricante).....	61
Tabela 5.4.	Características técnicas do superplastificante. (Fonte: Fabricante). .....	62
Tabela 5.5.	Resistências à compressão média e consumos máximos de água utilizados. ....	65
Tabela 5.6.	Volumes para 0,35 m <sup>3</sup> de pasta, (MEHTA & AİTCIN, 1990b).....	65
Tabela 5.7.	Relação entre os agregados miúdos e grãos conforme o nível de resistência, (MEHTA & AİTCIN, 1990b).....	66
Tabela 5.8.	Consumos dos materiais para os lotes preliminares, considerando os agregados no estado saturado com superfície seca. (MEHTA & AİTCIN, 1990b). ....	66
Tabela 5.9.	Planilha do método <i>Aİtcin</i> para os cálculos das quantidades.....	70
Tabela 5.10.	Valores definidos para “m”, “a” e “p” .....	73
Tabela 5.11.	Consumos dos materiais – Método <i>Mehta/Aİtcin</i> .....	77
Tabela 5.12.	Consumos dos materiais – Método <i>Aİtcin</i> .....	78
Tabela 5.13.	Consumos dos materiais – Método <i>IPT/EPUSP modificado</i> .....	78
Tabela 6.1.	Distribuição granulométrica do agregado miúdo, fonte LAME/LACTEC. ....	82
Tabela 6.2.	Resultados dos agregados miúdos da pesquisa, fonte LAME/LACTEC.....	83
Tabela 6.3.	Características do agregado grão proveniente de granito britado, fonte LAME/LACTEC.....	84
Tabela 6.4.	Resultados à compressão – Método <i>Mehta/Aİtcin</i> .....	87
Tabela 6.5.	Resultados à compressão – Método <i>Aİtcin</i> .....	89
Tabela 6.6.	Resultados à compressão – Método <i>IPT/EPUSP modificado</i> .....	91
Tabela 6.7.	D <sub>pad</sub> e CV% para o método <i>Mehta/Aİtcin</i> .....	93
Tabela 6.8.	D <sub>pad</sub> e CV% para o método <i>Aİtcin</i> .....	93
Tabela 6.9.	D <sub>pad</sub> e CV% para o método <i>IPT/EPUSP modificado</i> .....	94
Tabela 6.10.	Equações ajustadas e respectivos R <sup>2</sup> .....	94
Tabela 6.11.	Valores potenciais do método <i>Mehta/Aİtcin</i> .....	95
Tabela 6.12.	Valores potenciais do método <i>Aİtcin</i> .....	95
Tabela 6.13.	Valores potenciais do método <i>IPT/EPUSP modificado</i> .....	95
Tabela 6.14.	Informações sobre os agregados. ....	98
Tabela 6.15.	Custos dos materiais utilizados na pesquisa.....	98
Tabela 6.16.	Custos por materiais dos concretos produzidos.....	99
Tabela 6.17.	Custos e resistências dos concretos produzidos.....	100
Tabela 6.18.	Resultados de MENDES (2002).....	104
Tabela 6.19.	Resumo dos materiais aplicados no Evolution Towers. Fonte: Tesc Projetos Estruturais S/C Ltda.....	110
Tabela 6.20.	Parâmetros de cálculo segundo algumas normas internacionais.....	115
Tabela 6.21.	Resumo dos quantitativos para cada uma das três alternativas.....	116

Tabela 6.22.	Custos unitários dos aços, forma e serviços. (maio/2005).....	118
Tabela 6.23.	Serviços, formas e aços para as alternativas.....	118
Tabela 6.24.	Custos dos concretos a partir desta pesquisa.....	119
Tabela 6.25.	Valores levantados para as três alternativas.....	120
Tabela 6.26.	Resumo dos custos dos pilares para as alternativas; as soluções com valores menores estão salientadas em negrito.....	120

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A/A	RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE
ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ACI	AMERICAN CONCRETE INSTITUTE
AIT	MÉTODO DE DOSAGEM DE AİTCIN
ARI	ALTA RESISTÊNCIA INICIAL
CAD	CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO
CAR	CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA
CEB	COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON
CPs	CORPOS-DE-PROVA
CP	CIMENTO PORTLAND
C-S-H	SILICATO DE CÁLCIO HIDRATADO
$E_c$	MÓDULO DE ELASTICIDADE
$E_{cs}$	MÓDULO DE ELASTICIDADE SECANTE
EPUSP	ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
$f_c$	RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO
$f_{ck}$	RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO DO CONCRETO
FIP	FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAİNTE
kg	QUILOGRAMA
IPT	INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS
LACTEC	INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO
LAME	LABORATORIO DE MATERIAIS E ESTRUTURAS
$m^3$	METRO CÚBICO
MEH	MÉTODO DE DOSAGEM MEHTA/AİTCIN
MU	MASSA UNITÁRIA
MPa	MEGAPASCAL
NBR	NORMA BRASILEIRA
NS	NORGES STANDARDISERINGSFORBUND
PPGCC	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL
RBLE	REDE BRASILEIRA DE LABORATÓRIOS DE ENSAIOS
SA	SÍLICA ATIVA
SP	SUPERPLASTIFICANTE
UFPR	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

## RESUMO

Nos últimos anos cresceu a demanda por concretos mais duráveis e com maiores resistências. A evolução da tecnologia do concreto, com o conhecimento da microestrutura do concreto, com o uso da sílica ativa e aditivos superplastificantes tornou possível a produção de concretos com fatores água/aglomerantes baixos e alta resistência (CAR). O desenvolvimento do CAR preencheu algumas das necessidades de importantes obras por materiais mais adequados. No Brasil, é crescente a utilização de CAR como no Edifício E-Tower (São Paulo), recorde mundial em resistência de concreto. Em Curitiba, no ano 2000, foram feitas as primeiras aplicações de CAR em grandes obras como o Museu Oscar Niemeyer e o conjunto de edifícios Evolution Towers. Os métodos usados para a dosagem de concretos têm seu desempenho afetado pelas características dos materiais disponíveis em cada região. É importante a avaliação com materiais locais de técnicas para dosagem específicas para os CAR em vista destes concretos terem sua trabalhabilidade governada, muito mais, pelo uso de aditivos plastificantes e superplastificantes, do que pelo consumo de água. Esta pesquisa se concentra no estudo de métodos de dosagem para CAR utilizando agregados graúdos da Região Metropolitana de Curitiba, comparando os métodos *IPT/EPUSP Modificado*, *Mehta/Aïtcin* e *Aïtcin*, em relação ao seu desempenho para a obtenção de concreto de alta resistência. O produto final da pesquisa é a comparação das resistências à compressão, com os correspondentes custos dos concretos gerados pelos diferentes métodos, e análise dos resultados obtidos por meio do estudo de caso dos pilares do edifício corporativo do Evolution Towers.

## **ABSTRACT**

In the last past years, the demand for more durable and bigger strength concretes has been increased. The evolution of the concrete technology, the knowledge of concrete microstructure, the use of silica fume and superplasticisers became possible the production of concrete with low water/cement ratio and high strenght (HSC). The development of the HSC attended some of the necessities of new architectural trends. In Brazil, the application of HSC is increasing, e.g. the E-Tower Building (São Paulo), world-wide record in concrete resistance. In Curitiba, in year 2000, the first applications of HSC in important buildings have been done at Oscar Niemeyer Museum and in the construction of Evolution Towers Buildings. The methods for concrete mix design have its performance affected for the characteristics of the available materials in each region. The HSC mix design processes evaluation with local materials is important, because its workability is more governed by the use of plasticisers and superplasticisers, than by the water consumption. This research studies mix design methods for HSC using coarse aggregates of Curitiba Metropolitan Region. The studies compare the called IPT/EPUSP Modified Method, Mehta/Aïtcin Method and Aïtcin Method, using as parameters the strength and costs for several water/cementitious material ratio. Finally, the research performs a case study, considering the HSC application in pillars of the corporative building of the Evolution Towers for several characteristic compressive strengths.

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA**

A tecnologia do concreto armado é a técnica amplamente dominante na confecção de estruturas de edifícios no Brasil e, em especial, na Região Metropolitana de Curitiba, tanto por motivos econômicos, devido a disponibilidade de grandes indústrias de cimento na região (Cia. Cimento Rio Branco e Cia. Cimento Itambé), como por motivos culturais.

Nos últimos anos, o envelhecimento das estruturas de concreto e a conscientização crescente da demanda de se conhecer os fatores necessários à garantia da durabilidade das estruturas de concreto armado (HELENE, 1997a), assim como, do aumento das necessidades de concretos com resistências maiores, surgiu um crescente interesse da comunidade científica em pesquisar e melhorar esta área da tecnologia, com estudos sobre concreto de alta resistência, CAR, e concreto de alto desempenho, CAD. Durante um período o termo CAD foi inicialmente adotado, para todos os concretos com alta resistência, mas hoje, estes diferenciam-se dos CAR por ter, comprovadamente, por intermédio de ensaios específicos, uma alta durabilidade, além da alta resistência mecânica relativa aos CAR. Um CAD pode inclusive, possuir, no todo, um melhor desempenho, com relação a vários parâmetros, tanto de projeto como de execução e de estabilidade físico-química dentro do intervalo de trabalhabilidade necessário ao seu manuseio. Verifica-se que uma relação água/cimento baixa, que é a principal característica dos CAR, em geral conduz a concretos com menor porosidade e permeabilidade, e, segundo MEHTA (1999) e HELENE (1997b) a baixa relação água/cimento naturalmente usada nos CAR assegura tanto um bom desempenho quanto a durabilidade.

A evolução da tecnologia do concreto nos anos 70, em especial com a disponibilização dos aditivos superplastificantes (ACI 212.4R-93, 2001), tornou possível a produção de concretos com fatores água/aglomerantes baixos e, conseqüentemente, resistências mecânicas altas, ( $f_{ck}$  superiores a 50 MPa, CONCRETOS Grupo II, NBR-8953), sendo estes concretos então chamados de CAR. Novas adições como a sílica ativa, por promover reações que transformam os cristais de hidróxido de cálcio em microestruturas mais densas e sólidas, deixaram os CAR

ainda mais interessantes por facilitar a obtenção de resistências maiores com menores consumos de cimento (LIBÓRIO, 2004).

O desenvolvimento do CAR, com a decorrente melhora das características mecânicas do material e aumento da sua durabilidade, preencheu algumas das necessidades de fornecimento de materiais mais adequados para muitas novas e importantes obras. Nos anos 80, em diversas cidades dos Estados Unidos, foram construídos edifícios com estruturas de concreto com resistências à compressão da ordem de 50 a 120 MPa (MEHTA & AÏTCIN, 1990a). Em outros países muitas obras importantes passaram a usar CAR, como as torres “Petronas Towers”, Kuala Lumpur, Malásia, mostradas na Figura 1.1 (GARZON, 2004).



Figura 1.1. Exemplo de aplicação do CAR em estruturas de edifícios altos: Petronas Towers (Partner of the World - Germany, 1997), (GARZON, 2004).

No Brasil é crescente a utilização dos CAD e CAR, mostrando por meio de importantes obras sua vocação para chegar até os limites estabelecidos pela tecnologia impondo marcas mundiais na construção de edifícios com o uso de CAR, tais como:

- CENU – Centro Empresarial Nações Unidas (São Paulo, 2002). Recorde brasileiro em volume de concreto de alto desempenho -  $38.661 \text{ m}^3$  - e recorde brasileiro em altura de bombeamento de concreto de 156 m (ENGEMIX, 2004);

- Edifício E-Tower (em conclusão, São Paulo, 2001). Recorde mundial em resistência. Foram obtidas resistências à compressão de 125 MPa em média, máximo de 149,9 MPa aos 28 dias e, aos 63 dias, na ordem de 155,5 MPa (HARTMAN & HELENE, 2004).

Em Curitiba, assistiu-se, no ano 2000, as primeiras aplicações de CAR em grandes obras, tal como o Museu Oscar Niemeyer, conforme mostrado na Figura 1.2, onde, por necessidade de cronograma, aplicou-se concreto com resistência característica à compressão para três dias de 35 MPa (ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO, nº 78).



Figura 1.2. Exemplo de aplicação de CAR em Curitiba - Museu Oscar Niemeyer, (ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO, nº 78).

Como colocado no ACI 363R-92 (2001), a dosagem dos materiais para CAR tem variado amplamente e depende de muitos fatores como:

- nível de resistência requerido;
- idade da resistência característica desejada;
- características dos materiais;
- tipo de aplicação.

No ACI 363R-92 (2001) está salientado também, que a dosagem de CAR é muito mais crítica do que para concretos convencionais, pois existe uma interveniência importante de outros materiais como sílica ativa e superplastificantes, além da dificuldade adicional de se trabalhar com fatores água/cimento muito baixos.



Com frequência muitos ensaios são requeridos para gerar dados que habilitem o pesquisador a identificar as misturas ideais. Os métodos usados para a dosagem de concretos convencionais são baseados nas características dos materiais disponíveis em cada região, limitando-se em geral ao cimento Portland, agregados e água, como o colocado em ALVES (2000).

Pierre-Claude Aïtcin (AÏTCIN, 2000), em seu livro sobre CAD, afirma que é importante a avaliação de técnicas para a dosagem, específicas para CAR, em vista destes terem sua trabalhabilidade governada muito mais pelo uso de aditivos plastificantes e superplastificantes, do que pelo consumo de água.

A incorporação de aditivos e adições a estes concretos também torna difícil a utilização de métodos convencionais de dosagem. DAL MOLIN (1995) cita que é impossível, na realidade brasileira, pela enorme gama de materiais disponíveis, principalmente agregados, padronizar um método de dosagem.

Em 2002 foi defendida a primeira dissertação de mestrado na UFPR-PPGCC (Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil), por MENDES (2002), que trata do estudo experimental com CAR, utilizando agregados graúdos disponíveis na Região Metropolitana de Curitiba, tendo sido concluído que é perfeitamente possível a confecção de CAR com materiais locais. No seu trabalho, MENDES (2002) investigou a potencialidade de alguns agregados graúdos locais para a produção de CAR, em que foram comparados diversos CAR produzidos com diferentes agregados graúdos e a sua influência nas propriedades mecânicas.

Recentemente, foram publicados diversos trabalhos comparando métodos de dosagem para CAR, como o trabalho de ALVES (2000), um estudo comparativo entre métodos de dosagem para CAR, com o uso de materiais da região de Porto Alegre, onde a autora conclui que é impossível padronizar os métodos em função dos materiais. Outro trabalho com a mesma abordagem é o desenvolvido por PINTO *et al.* (2003), utilizando os materiais disponíveis na região metropolitana de Goiânia. O autor concluiu que nenhum dos métodos de dosagem apresentou maior economia em todas as resistências testadas.

Considerando –se o exposto, nota-se a importância de se verificar para os materiais da região metropolitana e Curitiba a eficiência de diferentes métodos de dosagem para a confecção de CAR.

## **1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

A pesquisa se concentra no estudo de métodos de dosagem para CAR, utilizando materiais da Região Metropolitana de Curitiba, complementando, desta forma, os métodos estudados por ALVES (2000), cujo trabalho se desenvolveu em Porto Alegre-RS, aplicando os agregados locais.

O objetivo principal é avançar com os trabalhos desenvolvidos por MENDES (2002) com os agregados locais, comparar os seguintes métodos: IPT/EPUSP Modificado (CREMONINI *et al.*, 2001), Mehta/Aïtcin (MEHTA & AÏTCIN, 1990b), e o método Aïtcin (AÏTCIN, 2000), em relação ao desempenho destes para a obtenção de CAR, utilizando-se materiais disponíveis na região Metropolitana de Curitiba. Igualmente comparar com os consumos de cimento, adições e aditivos, obtidos em MENDES (2002). O produto final da pesquisa é a comparação das resistências à compressão com os correspondentes custos dos concretos gerados pelos diferentes métodos, analisando-se os resultados obtidos dentro do estudo de caso dos pilares do edifício corporativo Evolution Towers.

## **1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA**

Com a finalidade de levar a pesquisa o mais próximo possível ao mercado local de concreto, optou-se por usar os mesmos materiais usados pelas principais concreteiras da região, (cimento CP V-ARI, agregados miúdos [areia natural] e graúdos [brita 1]). Para a escolha dos agregados graúdos, o critério de definição foi a do material mais adequado às altas resistências, definido pelo trabalho de MENDES (2002), sendo escolhida, então, uma brita de granito produzida em Quatro Barras-PR. As faixas de resistências mecânicas estudadas em MENDES (2002), são as mesmas do desenvolvimento dos trabalhos desta pesquisa que, também, aproveita alguns dos traços e resultados brutos, apresentados pelo autor.

Quanto à sílica ativa o ACI 363R-92 (2001) coloca que adições entre cinco e quinze por cento da massa de cimento são as mais usuais. Também, como limitação à comparação dos métodos de dosagem, fixou-se o teor de sílica ativa como substituição de oito por cento da massa de cimento. Este valor foi definido em função da otimização da eficiência desta adição realizada durante o desenvolvimento dos trabalhos de MENDES (2002) com os materiais da região metropolitana de Curitiba, considerando diversos agregados comercialmente disponíveis. Este valor de adição está de acordo com os trabalhos de CARNEIRO *et al.* (2004) e BAUER *et al.* (2004) que concluem que com valores inferiores a 5% não obtém todos os ganhos na resistência e, superiores a 10%, não obtém acréscimos na resistência à compressão.

Devido as centrais de concreto da região metropolitana de Curitiba não utilizarem, atualmente, adições de cinzas volantes ao seu produto, esta adição não fez parte do escopo desta pesquisa.

Novamente pela necessidade de fixar-se parâmetros, a pesquisa fez uso de um único aditivo superplastificante para todos os métodos. O aditivo utilizado foi selecionado devido aos seguintes fatores: o mesmo é de terceira geração, permitindo assim um maior tempo de validade para este estudo, embora este superplastificante, atualmente, ainda possua custo unitário elevado, este aditivo gerou resultados de fluência no cone de Marsh, NBR 7682 (1983), superiores aos do aditivo à base de naftaleno sulfonado usado por MENDES (2002); e por fim são aditivos de terceira geração que as concreteiras estão aplicando para produção de CAR/CAD no mercado local, como na obra do Evolution Towers que é objeto de um estudo de caso nesta dissertação.

Devido às limitações desta pesquisa, para o seu desenvolvimento experimental foram escolhidos, somente, três métodos de dosagem, todos próprios para CAR. Os critérios usados para a escolha específica de cada um dos métodos foram:

- a) *Método IPT/EPUSP modificado*, CREMONINI *et al.* (2001): foi escolhido por ser um método novo, desenvolvido para materiais nacionais, otimizado para CAR a partir do método IPT/EPUSP, que é amplamente utilizado no Brasil para concretos convencionais. É um método que tem por finalidade principal minimizar o consumo de cimento;

- b) *Método MEHTA/AİTCIN*, (MEHTA & AİTCIN 1990b): foi selecionado por ser um método mundialmente conhecido, ser extremamente prático na aplicação e de fácil desenvolvimento e execução. Também este método foi um dos que gerou menores custos e consumos de cimento com os materiais da região metropolitana de Porto Alegre-RS, de acordo com ALVES *et al.*, (2003);
- c) *Método AİTCIN*, (AİTCIN 2000): foi selecionado por usar a mesma abordagem do ACI 211 (1989), mas voltado para faixas de resistências bem mais altas. Também, é um método de fácil execução e leva em consideração características dos materiais que outros métodos não utilizam.

O estudo previa, inicialmente, também, a comparação do método TORALLES-CARBONARI (1996), mas devido aos resultados demonstrados em ALVES (2000) não serem bons, assim outras características deste método, como a quantidade de traços, consumos de materiais superiores ao disponível e os prazos necessários para os estudos e rupturas, não foi possível o desenvolvimento deste método.

Como parâmetro para comparação dos diversos métodos de dosagem utilizados foi adotada a resistência à compressão simples  $f_c$  (NBR 5739,1994), executada sobre corpo-de-prova cilíndricos (10 x 20) cm com rupturas nas idades de 3, 7 e 28 dias.

## **1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA**

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos. No Capítulo 1 foi feita uma introdução à pesquisa, destacando-se a sua justificativa, importância, objetivos, limitações e estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 foi apresentada a revisão bibliográfica sobre CAR, destacando-se: histórico, definições, aplicações, viabilidade técnica e econômica, assim como alguns trabalhos relacionados.

No Capítulo 3 foi feita uma descrição sobre a estrutura interna do concreto, uma explanação sobre as características dos materiais para a confecção de CAR, além de explicações sobre a compatibilidade do cimento com o aditivo superplastificante.

No Capítulo 4 foram apresentadas as características para a produção e controle de qualidade do CAR e as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

O Capítulo 5 contém uma descrição da metodologia aplicada, com a sequência para o desenvolvimento dos métodos de dosagem e ensaios sobre os concretos.

No Capítulo 6 estão os resultados dos ensaios preparatórios, as dosagens confeccionadas com seus resultados, assim como, uma análise destes. Também neste capítulo está um estudo de caso sobre o uso de CAR no conjunto de edifícios do Evolution Towers em Curitiba.

E, no Capítulo 7, as discussões finais sobre os resultados, as conclusões e sugestões para novas pesquisas.

## **2. CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA**

Neste capítulo foi feita uma descrição da evolução da tecnologia dos concretos de alta resistência, assim como das suas principais aplicações básicas no Brasil e nos outros países, são, também, apresentadas algumas definições e considerações sobre as vantagens e desvantagens da sua aplicação comparativamente ao concreto convencional.

### **2.1 HISTÓRICO E PRINCIPAIS APLICAÇÕES**

Apesar dos estudos na última década o CAR é, com frequência considerado, pela comunidade técnica, um material relativamente novo. Na região metropolitana de Curitiba e no Paraná seu uso ainda é insipiente, salientando-se que o desenvolvimento desta tecnologia vem ocorrendo de forma gradual e continuada por muitos anos.

O ACI 363R-92 (2001), afirma que, nos E.U.A., na década de 50, concretos com resistência de 34 MPa eram considerados de alta resistência. Na década de 60, concretos com até 52 MPa de resistência à compressão já eram comercializados.

Em Curitiba, na década de 60, usou-se concretos com resistência característica à compressão de 40 MPa no então edifício da Secretaria de Educação, atual Museu Oscar Niemeyer, (Figura 2.1). Até o início da década de 60 era muito limitada a disponibilidade de concretos com resistências à compressão superiores a 41 MPa, (ACI 363R-92, 2001). Mais recentemente, as aplicações de CAR aumentaram muito e vêm sendo usadas em muitas partes do mundo. Este crescimento foi possível devido à evolução e recente desenvolvimento da tecnologia de materiais, que é correspondido pelo aumento da sua demanda.

Quanto à assunção de riscos é importante lembrar que a decisão dos empreendedores e empreiteiros em utilizar novas tecnologias, como os CAR, em suas estruturas é sempre difícil devido às inerentes dificuldades envolvidas. Foi muito interessante a abordagem usada em Chicago nos anos 60, citada em AITCIN (2000), onde sempre que um grande edifício estava sendo planejado, o produtor de concreto em conjunto com o projetista estrutural, solicitava a permissão para incluir sem custos extras para o incorporador, uma ou duas colunas feitas em concreto experimental com resistência à compressão de 10 a 15 MPa superiores ao  $f_{ck}$  solicitado pelo projetista.

Devido ao pequeno risco quase sempre houve a concordância. Desta forma, provava-se ser possível fazer e entregar um concreto confiável 10 a 15 MPa maiores que o habitual, ficando fácil usa-lo em novos projetos por já estar testado, abrindo caminho à redução dos tamanhos dos pilares e aumento das áreas disponíveis. Com o uso deste procedimento, dentro em um período de dez anos, levantou-se a resistência à compressão de 15 a 20 MPa para 45 a 60 MPa. No início da década de 70 já se aplicavam nos E.U.A. concretos de 62 MPa (ACI 363R-92, 2001).



Figura 2.1. Edifício que compõe o atual Museu Oscar Niemeyer – Curitiba - Pr, construído em 1968 usando concretos com  $f_{ck}$  de 40 MPa. Fonte: TESC – Projetos Estruturais S.C.

No início da década de 70, nos EUA tornou-se usual a aplicação de resistências à compressão da ordem de 60 MPa, atingindo-se um limite técnico, AITCIN (2000). Era impossível de se obter resistências superiores devido ao limite dos aditivos plastificantes então existentes, não se conseguia reduzir mais o fator água/cimento e nem manter uma trabalhabilidade que permitisse a utilização do concreto.

Foi nesse contexto de desenvolvimento da tecnologia que foram, pela primeira vez, usados os aditivos superplastificantes. Nos anos 80, pouco a pouco, foram se aumentando as dosagens destes aditivos, mostrando que estes funcionavam como redutores de água de grande efeito (AİTCIN, 2000 apud ALBINER & MORENO, 1991), assim viabilizou-se a produção de concretos com fatores água/aglomerantes baixos e resistências características com 50 MPa ou mais (CONCRETOS Grupo II, NBR-8953), sendo estes concretos denominados CAR.

Simultaneamente, na década de 80, pesquisadores desenvolveram pesquisas sobre o uso de sílica ativa, um tipo de pozolana muito fina e reativa, como material cimentício suplementar, onde ficou provado que o seu uso é muito vantajoso ao concreto, (AİTCIN, 2000). A aplicação de adições de sílica ativa, em percentuais da ordem de 8 a 10% da massa de aglomerante, tornou os CAR mais viáveis, facilitando a obtenção de resistências maiores com menores consumos de cimento.

SERRA (1997) declara que a sílica ativa em conjunto com os superplastificantes aumenta a compacidade, baixando a porosidade e aumentando a resistência, além de minimizar a ocorrência das microfissuras decorrentes da retração. Deve ser salientado que a redução da porosidade e das microfissuras de retração favorecem em muito a durabilidade do concreto. ALMEIDA (1992), assegura que foi a incorporação conjunta destes materiais (sílica ativa e superplastificantes) que transformou os concretos correntes em verdadeiros super-concretos, com maior durabilidade e resistência superior.

O desenvolvimento de concretos com melhores características mecânicas e maior durabilidade, atendeu as necessidades existentes de materiais mais adequados para as arrojadas idéias criadas pela arquitetura. Nos anos 80, em diversas cidades dos Estados Unidos foram construídos edifícios com estruturas de concreto com resistências à compressão da ordem de 50 a 120 MPa (MEHTA & AİTCIN, 1990a), (Tabela 2.1)., MALHOTRA (1998) *apud* RICHARD & CHEYREZ, cita pesquisas que com concretos pós-reativos atingiram-se resistências à compressão de 200 MPa.

Em 1998 ficaram prontas as torres “Petronas Towers”, Kuala Lumpur, Malásia, como mostrado na Figura 1.1, estruturadas em CAR até o 80º pavimento (o topo, os anexos em da base e a passarela, que interliga os rédios, tem estruturas em aço),



que, totalizando 450 m de altura com 88 pavimentos, assumiram a posição de edifícios mais altos do mundo (GARZON, 2004). Na Tabela 2.1 é apresentada uma série de obras onde foram usados CAR, relacionando alguns dados da composição dos concretos.

Tabela 2.1. Edifícios executados com CAR. Fonte: DAL MOLIN *et al.* (1997).

EDIFÍCIO	LOCAL	ANO	Nº Pav	f <sub>ck</sub> MPa	Relação a/(c+ag)	C kg/m <sup>3</sup>	Adições kg/m <sup>3</sup>
MASP	São Paulo	1963		45	0,32	565	
Lake Point Tower	Chicago	1965	70	52			
Water Tower Place	Chicago	1975	79	62	0,35	505	CV-12%
River Plaza	Chicago	1976	56	62 <sup>+</sup>	0,35	505	CV-12%
Columbia Center	Seattle	1983	76	66	0,25	384	CV-20%
Interfirst Plaza	Dallas	1983	72	69			
311 South Wacker Drive Tower	Chicago	1989	79	83		272	SA
Grand Arche de la Défense	Paris	1988		65	0,40	425	SA-7%
Two Union Square	Seattle	1989	58	115	0,20	513	SA-8%
Pacific First Center	Seattle	1989	44	115		534	CV-11% SA-1%
Scotia Plaza Building	Toronto	1988		70	0,30	315	E-43% AS-11%
One Wacker Place	Chicago	1990	100	80			
CNEC	São Paulo		18	60	0,28	523	SA-12%
225 W. Wacker Drive	Chicago	1989	31	96 <sup>++</sup>			SA
Melbourne Central Tower	Melbourne	1990	55	80	0,33		SA
Cond. Emp. Previnor	Salvador		18	60	0,32	560	SA-10 a 12%
Suarez Trade	Salvador	1993	31	60	0,29	540	SA-11%
First Republic Bank Plaza	Dallas	1986	72	69	0,35	354	CV-42%
One Peachtree Center	Atlanta	1991	95	83	0,29		SA-8,7%
<p><b>LEGENDA:</b> CV - Cinza Volante; SA – sílica ativa ; E – Escória.</p> <p><b>NOTA:</b> + - dois pilares experimentais de 76 MPa;</p> <p>++ - pilar experimental de 117 MPa.</p>							

Em São Paulo, recentemente, usou-se concretos com resistência característica à compressão de até 125 MPa no edifício E-Tower com 42 andares e 162 m de altura. (Figura 2.2). Usando aditivos superplastificantes para obter um abatimento de 140 a 200 mm usando uma relação água/cimento de 0,19 e adições de sílica ativa e argila calcinada (HARTMAN & HELENE, 2004).

Em Curitiba, como já citado na introdução deste trabalho, no ano 2000, foi utilizado CAR em duas estruturas importantes, o Museu Oscar Niemeyer, (Figura 1.2), e o conjunto arquitetônico Evolution Towers, onde CAR com  $f_{ck}$  de 60 MPa foi aplicado em parte dos blocos das fundações e em alguns pilares, (ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO, nº 94, 2004).



Figura 2.2. Edifício e-Tower, São Paulo, em 8/2004, (HARTMAN & HELENE, 2004).

## 2.2 DEFINIÇÕES

O recente aparecimento e a contínua elevação de limites dos concretos com elevadas resistências à compressão, têm levado a alguma controvérsia quanto a denominações claras e inequívocas destes materiais.

Na primeira norma brasileira de concreto, o “Regulamento para as Construções em Concreto Armado da Associação Brasileira de Concreto-ABC, de 1931”, consta

que a resistência máxima à compressão estava limitada a uma resistência à compressão média de 26 MPa (HELENE, 1997a). A redação atual da “NB 1 da ABNT (NBR 6118, 2003) Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado”, ainda não contempla concretos com resistência à compressão de projeto acima de 50 MPa.

A NBR-8953, (1992), que classifica concretos, define os com resistência à compressão superior a 50 MPa como de Classes II, (Classe I são os concretos abaixo de 50 MPa). Portanto, no Brasil, esse valor é considerado o limite entre concretos convencionais e os de alta resistência.

Um concreto que apresente média de resistência à compressão superior a usual em um dado local ou época é definido como CAR (DAL MOLIN *et al.*, 1997). NAWY (1996) entende que o conceito de CAR é relativo, uma resistência considerada normal para uma situação pode ser alta para outra. Na Europa, o termo “concreto de alto desempenho” ou CAD, (HPC sigla em inglês de “*high performance concrete*”), é utilizado para concretos com resistência à compressão superior a 60 MPa, aos 28 dias, ou fatores água/cimento abaixo de 0,40 (De LARRARD & SEDRAN, 2002). Nos E.U.A., um concreto de alto desempenho é uma mistura especial que atinja especificações que não podem ser rotineiramente alcançados (De LARRARD & SEDRAN, 2002).

A evolução ocorrida nas características mecânicas dos concretos vem, também, acompanhada de uma evolução positiva de outras propriedades, especialmente aquelas relacionadas à durabilidade AÏTCIN (2000). Melhorias nas propriedades e características como maior módulo de elasticidade, maior resistência à tração e ao cisalhamento, e reduzida carbonatação e difusão de cloretos são, também, observadas (HELENE, 1997b).

O alto desempenho desses concretos abre novas perspectivas de uso em inúmeros tipos de obras arrojadas, como edifícios muito altos e pontes com grandes vãos, ou obras localizadas em ambientes inadequados para concretos convencionais, como por exemplo as plataformas de petróleo e tanques enterrados, entre outros.

## 2.3 VANTAGENS E ÁREAS DE APLICAÇÃO

AMARAL (1993), curso sobre CAR, já citava algumas das principais aplicações para as quais as características especiais deste tipo de concreto são particularmente importantes, como: pilares de edifícios, grandes estruturas, obras marítimas, pré-moldados, obras hidráulicas, reparos em obras de concreto, pisos de alta resistência e peças mecânicas. Também salientava as propriedades especiais dos CAR com sílica ativa: baixa permeabilidade, alta resistência aos ataques de cloretos e sulfatos, alta resistência à abrasão, ótima aderência sobre concretos velhos, quase o dobro da aderência concreto-aço em relação aos concretos convencionais, altas resistências mecânicas à baixa idade, baixa segregação e ausência de exsudação.

Em sua tese de Doutorado, DAL MOLIN (1995), coloca as principais vantagens do CAR em relação ao concreto convencional e outros materiais de construção, salientando as seguintes características:

- diminuição das dimensões das peças estruturais, principalmente pilares de edifícios altos, fato que aumenta e melhora os espaços livres, principalmente nos andares mais baixos e mais sobrecarregados;
- vigas mais esbeltas e de maior comprimento, reduzindo a quantidade total de vigas necessárias em cada pavimento;
- redução do peso total das estruturas, com a conseqüente redução das cargas nas fundações;
- redução das deformações imediatas como conseqüência de um maior módulo de deformação;
- minimização das deformações lentas, com a redução da fluência devido a menor quantidade de vazios na pasta de cimento;
- aumento da durabilidade das estruturas, pelo fato dos CAR serem menos porosos e permeáveis, estando assim menos expostos aos ataques dos agentes agressivos presentes no meio ambiente;
- redução nos custos devido à redução do volume de concreto necessário;
- maior rapidez de execução.

Um grande campo de aplicação para os CAR tem sido a sua aplicação em pontes. Em seu artigo, CARRASQUILLO & CARRASQUILLO (1988), relacionam algumas vantagens específicas de se usar CAR neste tipo de obras:

- maior resistência à compressão por unidade de custo, peso e volume;
- maior módulo de deformação, que é vantajoso quando deflexões controlam o projeto;
- viabilização da execução de maiores vãos.

Agregando-se ao conjunto das características dos CAR, mencionadas anteriormente, percebe-se que este é um material extremamente indicado para otimizar alguns dos problemas da engenharia moderna, tais como:

- retorno do investimento financeiro mais rápido, pois devido a sua alta resistência nas primeiras idades, permite um encurtamento do cronograma das obras;
- menores custos, por possibilitar mais e melhores opções de relações entre o custo e a resistência à compressão dos diversos concretos;
- melhor aproveitamento dos recursos ambientais, devido a maior durabilidade das estruturas e sua maior resistência mecânica, minimizando o consumo de matérias primas nobres, e permitindo igualmente, projetos arquitetônicos que melhoram o aproveitamento dos espaços nas edificações.

É, também, importante salientar que a aplicação de CAR tem pontos negativos, como:

- maior dificuldade de aplicação devido à maior coesão decorrente do uso da sílica ativa, e da perda de abatimento (LIBÓRIO, 2004);
- exigência de um controle de qualidade mais apurado (AİTCIN, 2000);
- necessidade de procedimentos de cura, devido ao uso da sílica ativa e do baixo consumo de água (AİTCIN, 2000).

Inserido neste contexto, tendo em vista os grandes benefícios que podem ser obtidos com o uso deste material, o estudo dos CARs torna-se muito importante para a sociedade, em especial para a comunidade de engenheiros e de construtores.

## **2.4 CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS SOBRE O USO DOS CAR/CAD EM ESTRUTURAS DE EDIFÍCIOS**

Muitos estudos já foram feitos a respeito da viabilidade da aplicação dos CAR em edifícios altos, fazendo comparações com soluções em concreto convencional e análises de soluções com CAR variando as resistências características à compressão, com o uso desses em toda a estrutura ou somente nos pilares.

Nos CAR e CAD, o alto consumo de cimento, a incorporação de aditivo superplastificante, a adição de sílica ativa, a necessidade do uso de agregados de alta qualidade e a maior complexidade do seu uso, inevitavelmente, fazem com que o custo unitário deste material seja bastante superior ao dos concretos convencionais. Entretanto, a resistência mecânica superior dos CAR, possibilita aos projetistas de estruturas reduzir o consumo de concreto aplicado e mais significativamente reduzir o peso de aço necessário para os pilares. Outros fatores que interferem nas comparações de custos das obras são:

- reduções de solicitações nas fundações;
- reduções nas áreas de formas; reduções de custos de manutenção da estrutura, devido a maior durabilidade destas.

O ACI 363R-92 (2001) relata que um CAR é um material que representa o estado-da-arte da tecnologia de concreto, portanto, inevitavelmente, tem um custo unitário mais alto, mas em muitas aplicações os benefícios da maior resistência superam estes aumentos. Basicamente, usando um CAR, comparado a um concreto convencional, tem-se um aumento de maior proporção na capacidade de suporte de carga do que nos custos.

Um dos primeiros estudos interessantes sobre a viabilidade econômica dos CAR, no Brasil, foi feito em 1990 e citado em DAL MOLIN *et al.* (1997). Considerou a realidade brasileira e fez uma comparação entre um concreto convencional de 21 MPa e CAR de 60 MPa, abordando a estrutura de um edifício com 15 pavimentos em Porto Alegre-RS. No estudo, considerando-se o concreto, as armaduras e as formas, (inclusive a mão-de-obra), se comparou, também, o uso do CAR só nos pilares e na estrutura como um todo. Com estas comparações chegou-se à conclusão de que a aplicação do CAR naquele caso possibilitou reduções de custos.

O estudo chega a uma economia de 12% no custo da estrutura com o uso de CAR em todas as peças estruturais e uma economia de 11,5% com a aplicação de CAR somente nos pilares.

FERREIRA *et al.* (2001) fizeram um estudo em que analisou o uso de concreto convencional e CAD na estrutura de um edifício de 33 pavimentos em Belém-PA, comparando três modelos de soluções estruturais diversas, uma com concreto convencional de 30 MPa, outra aplicando CAD de 45 MPa e 60 MPa nos pilares e uma terceira com CAD de 45 MPa e 60 MPa nos pilares, vigas e lajes. Quanto aos custos, o estudo concluiu, a partir dos volumes de concreto, dos pesos de aço, das formas e das cargas nas fundações, que existiu uma economia de 6,7% com o uso do CAD nos pilares e de 10,37% do uso de CAD nos pilares, vigas e lajes, comparando com a estrutura em concreto convencional.

Dentro do contexto, visando complementar os estudos dos custos dos CAR, e para melhor representar a situação na região metropolitana de Curitiba, também foi desenvolvido um estudo de caso comparativo da aplicação de CAR no conjunto arquitetônico Evolution Towers, primeira grande aplicação de CAR na cidade e concluída em 2004, mostrado no item 6.5 deste trabalho.

## **2.5 ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE CAR E CAD**

O recente aumento da preocupação com a durabilidade das estruturas de concreto armado, assim como a crescente demanda por concretos com resistências maiores, muitas pesquisas e estudos sobre CAR e CAD têm sido desenvolvidos no Brasil e no mundo.

O estudo destes concretos, no Brasil, vem se acelerando muito, ALMEIDA (1996), realizou um levantamento que envolvia estudos sobre CAD, encontrando, então, mais de oitenta trabalhos sobre diversas características do material.

Já aconteceram, no Brasil, três grandes eventos internacionais sobre o assunto: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES (1996); INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES (1999); CONFERENCE ON

HIGH-PERFORMANCE CONCRETE; AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES (2002), todos com uma intensa participação da comunidade científica brasileira.

Em Curitiba, na UFPR, nos anos de 1998 e 1999, no LAME, (LAME - Laboratório de Materiais e Estruturas do LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, órgãos ligados a Universidade Federal do Paraná - UFPR e Companhia Paranaense de Eletricidade - COPEL), com a colaboração do CESEC - Centro de Estudos em Engenharia Civil/UFPR, foram publicados os primeiros estudos sobre o assunto, abrangendo alguns estudos preliminares sobre CAR, os quais foram os primeiros estudos feitos na UFPR. O intuito destes estudos foi de criar um início do conhecimento e difusão da tecnologia dos CAR/CAD, cujos resultados foram publicados em quatro relatórios técnicos (NOGUEIRA, 1998) e uma monografia de especialização (NOGUEIRA, 2000).

Em 2002 foi defendida a primeira Dissertação de Mestrado na UFPR-PPGCC, trabalho de MENDES (2002), o qual é um estudo experimental com CAR, utilizando agregados graúdos disponíveis na Região Metropolitana de Curitiba, onde foi concluído que é perfeitamente possível a confecção de CAR com materiais locais. No seu trabalho Mendes investigou:

- a potencialidade de alguns agregados graúdos locais para a produção de CAR;
- a comparação de diversos CARs produzidos com diferentes agregados graúdos;
- a influência dos agregados graúdos nas propriedades mecânicas dos CAR (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade); e
- a correlação entre a resistência à compressão e as demais propriedades.

No Brasil já existem diversos trabalhos recentes que avaliam e/ou comparam métodos de dosagem de concretos, em especial os CAD e CAR, utilizando materiais regionais.

Em Porto Alegre-RS, ALVES (2000) fez um estudo comparativo entre métodos de dosagem para CAR com o uso de materiais da região de Porto Alegre, no qual selecionou e comparou quatro métodos de dosagem, *Método IPT/EPUSP*, para concretos convencionais, *Método Mehta/Aitcin*, *Método Toralles-Carbonari* e *Método Aitcin*.



Entre as conclusões colocadas em ALVES (2000) destaca-se que os métodos de dosagem de CAR são, na sua maioria, métodos empíricos baseados na experiência de seus autores. Cada um desses métodos foi desenvolvido considerando os materiais existentes em cada região. ALVES (2000) sugere que é impossível padronizar os métodos em função dos materiais, havendo a necessidade de ajustar os métodos para os materiais mais comumente empregados.

Em Goiânia-GO foi desenvolvido outro trabalho, usando materiais disponíveis na região metropolitana de Goiânia, que avaliou os métodos para a dosagem dos Concretos de Alto Desempenho. Nesse trabalho, PINTO *et al.* (2003), compara três métodos de dosagem, dois específicos para CAD: *Método Mehta/Aïtcin* e o *Método Aïtcin* (AÏTCIN, 2000); e um método para concreto convencional, o *Método Furnas*. A conclusão obtida é de que nenhum dos métodos de dosagem apresentou maior economia em todas as faixas de resistência.

Usando os materiais disponíveis na região metropolitana de Belém-PA, PINHO *et al.* (2004), apresentou um estudo comparativo de dois métodos de dosagem, analisando o método *IPT/EPUSP modificado para CAD*, (CREMONINI *et al.*, 2001) e o método *Aïtcin*, (AÏTCIN, 2000). Devido às características ruins dos agregados disponíveis, só foi possível obter resistências abaixo de 60 MPa. O estudo concluiu que embora o método *Aïtcin* tenha produzido concretos com menores consumos de cimento, o método *IPT/EPUSP modificado* produziu concretos de menor custo.

Considerando-se os relatos dos trabalhos anteriormente apresentados pretende-se dar ênfase a idéia do estudo proposto no presente trabalho, que objetiva comparar alguns métodos de dosagem para CAR, utilizando os materiais disponíveis na Região Metropolitana de Curitiba, visa, igualmente, difundir mais a tecnologia, para contribuir na desmistificação da produção deste tipo de concreto, bem como prover o mercado local de concreteiras com mais uma ferramenta e informações.

### **3. A MICROESTRUTURA E OS MATERIAS NO CAR**

Embora o concreto seja composto por água e cimento que formam a pasta, junto com os agregados, em sua microestrutura interna, ele apresenta três partes ou fases distintas, a saber: a pasta matriz (ou pasta de cimento hidratada, que é a massa contínua de cimento hidratado entre os grãos dos agregados), os agregados (ou o esqueleto granular) e a camada intersticial de interface entre os agregados e a pasta (ou zona de transição) (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

A microestrutura dos CAR, devido às baixas relações água/aglomerante usadas e ao uso de adições como a sílica ativa e aditivos superplastificantes, há algumas particularidades a saber em relação aos concretos convencionais, tais como uma pasta de cimento com menor quantidade de vazios em especial uma zona de transição entre os agregados e a pasta mais compacta (LIBÓRIO, 2004). A seguir, apresenta-se cada uma das fases que compõem a microestrutura do concreto.

#### **3.1 A FASE AGREGADO**

Nos concretos, em geral, a fase agregado ocupa a parte mais significativa do volume (60 a 70% do total); portanto, os agregados materiais têm grande influência sobre as propriedades do concreto. As características dos agregados afetam as propriedades do concreto como a resistência à compressão, devido à resistência mecânica da rocha e a aderência dos grãos com a pasta, que varia de acordo com detalhes geométricos dos grãos, como o seu formato, lamelar ou cúbica, petrografia, rugosidade superficial e a porosidade. A dimensão máxima característica dos grãos dos agregados graúdos também pode ser um fator limitante para a resistência à compressão (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Ao contrário do que ocorre em concretos convencionais, em concretos com relações água/aglomerante baixas e resistências à compressão elevadas, as fases da pasta matriz e da zona de transição se tornam tão resistentes que a fase dos agregados pode-se tornar a mais fraca (AİTCIN, 2000).

A fase agregado, devido a sua predominância volumétrica no concreto, também é a principal responsável por propriedades como a massa específica, o módulo de

elasticidade, a estabilidade dimensional e a condutibilidade térmica (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

### **3.2 A FASE PASTA MATRIZ**

O cimento Portland é formado por partículas sólidas compostas, principalmente, por silicatos e aluminatos anidros. Com a hidratação estes compostos formam cristais em torno dos grãos de cimento, que com o passar do tempo crescem em tamanho, aumentando a densidade, solidificando e dando resistência mecânica à pasta. Desta maneira, a microestrutura da pasta, cheia de vazios, com o passar do tempo vai se tornando cada vez mais compacta (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Segundo estes autores, as principais microestruturas que se formam na pasta matriz são:

- estruturas fibrilares ou estruturas C-S-H: compostos químicos formados por cristais de silicatos de cálcio hidratados que representam 50% a 60% do volume total de sólidos da pasta e são os responsáveis pela resistência mecânica da pasta após os dias iniciais;
- prismáticas: cristais de grande tamanho, formadas por hidróxido de cálcio, que representam 20 a 25% do volume total de sólidos da pasta. São responsáveis pelo pH elevado da pasta ( $\text{pH} \cong 13$ ), mas são bastante solúveis em água. Tem baixa resistência mecânica;
- etringita: cristais grandes e volumosos, formados pela hidratação dos aluminatos combinados com sulfato de cálcio, quimicamente instáveis e muito porosos, gerando estruturas com baixa resistência mecânica que com o tempo se transformam em monossulfato. São os primeiros cristais da pasta a se formar e produzem a primeira resistência mecânica do endurecimento, pequena se comparada a das estruturas C-S-H. Representam 15 a 20% do volume total de sólidos;
- grãos de clínquer não hidratados: pequenos núcleos dos grãos de cimento.

Além das microestruturas sólidas, os vazios são de grande influência nas características da pasta matriz endurecida. Quanto maiores a quantidade de vazios e maiores forem os seus diâmetros médios, maiores serão a porosidade e a permeabilidade, reduzindo a resistência química e mecânica da pasta, aumentando também a sua retração e a fluência.

Os principais vazios da pasta, colocados em MEHTA & MONTEIRO (1994), estão mostrados na Figura 3.1 e são descritos a seguir:

- espaço interlamelar das estruturas C-S-H, lamelas muito próximas, cujo afastamento fica entre 5 a 25 Å ( $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ ). São poros muito pequenos, que pouco afetam a resistência mecânica ou a permeabilidade da pasta. O principal efeito desses poros é a retração, quando a água que os preenche, sai;
- vazios capilares: são poros onde o excesso da água de amassamento fica aprisionado. Somente cerca de 21% do peso de cimento em água, fica combinada quimicamente na pasta (água estequiométrica). A maior parte da água colocada além deste percentual fica aprisionada nestes poros. Poros capilares com diâmetros superiores a 500 Å favorecem a permeabilidade e prejudicam a resistência mecânica, já poros com diâmetros inferiores a 500 Å influenciam mais a retração e a fluência (MEHTA & MONTEIRO 1994);
- ar incorporado são pequenas bolhas de ar com diâmetro médio de 5 mm, aprisionadas pelo concreto durante o processo de mistura dos seus componentes. Normalmente, cerca de 1 a 2% do volume total de um concreto é ar. Formam bolhas com diâmetro de 50 a 200 µm, que favorecem a trabalhabilidade (NEVILLE, 1997 e MEHTA & MONTEIRO, 1994).

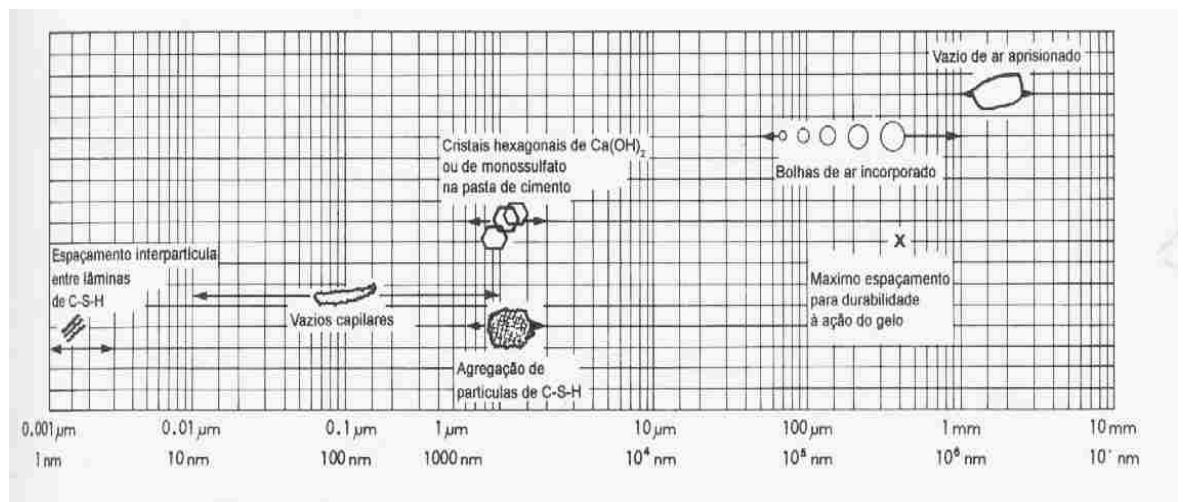


Figura 3.1. Dimensões dos sólidos e vazios da pasta endurecida, mostrados em escala logarítmica, (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Nos CAR, com a adição de sílica ativa ao cimento ocorrem sobre a pasta matriz efeitos químicos e físicos. A ação química é decorrente da reação pozolânica entre a sílica ativa e o hidróxido de cálcio, produzindo uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que obstruem e reduzem os poros. A ação física é o efeito filer, que preenche os vazios criados pela água livre na pasta matriz, produzindo um melhor empacotamento da microestrutura. Esses efeitos, em conjunto, causam uma melhora na microestrutura, e nas características da zona de transição, tornando a pasta matriz mais densa e diminuindo a sua permeabilidade. Aumenta assim, a resistência dos concretos. Entretanto, como a sílica ativa é mais fina que o cimento, ocorre um aumento do consumo de água do concreto e das quantidades necessárias de aditivos superplastificantes. (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

### **3.3 A FASE ZONA DE TRANSIÇÃO**

A zona de transição, camada microscópica intersticial interface entre os agregados e a pasta matriz, tem composição química e características mecânicas diferentes das da pasta matriz. A resistência mecânica desta região é de extrema importância para a resistência à compressão do concreto, com espessura variando de 10 a 50  $\mu\text{m}$  é a parte mais fraca do sistema (DOMONE & SOUTSOS, 1994). É nesta região que em geral se inicia a ruptura de um concreto, (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

As razões mais importantes, origem das características da zona de transição, são a exsudação interna e a concentração de cristais de etringita e de hidróxido de cálcio. A exsudação interna é causada pela migração no sentido vertical do excesso da água de amassamento, formando uma fina película de água sob a superfície inferior dos grãos dos agregados devido ao efeito-parede, principalmente nos graúdos, (ver a Figura 3.2), aumentando a relação água/aglomerante e reduzindo a resistência mecânica desta região, (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Devido ao efeito de nucleação das partículas sólidas dos agregados presentes no concreto fresco, forma-se em torno desses uma alta concentração de cristais de hidróxido de cálcio e de etringita, ver na Figura 3.3. São cristais grandes, porosos e com baixa resistência mecânica (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Com o aumento da idade, como a etringita é instável quimicamente, lentamente criam-se na região estruturas tipo C-S-H, sendo que a resistência da zona de transição aumenta podendo ficar até maior que a da pasta matriz, (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

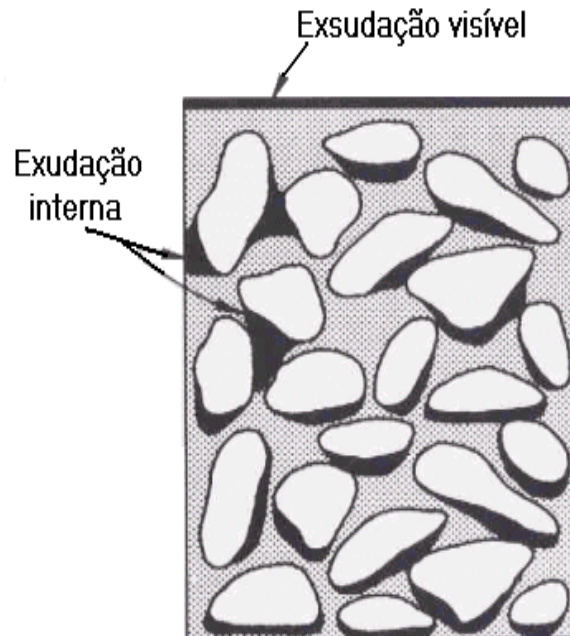


Figura 3.2. A exsudação interna e a externa, (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

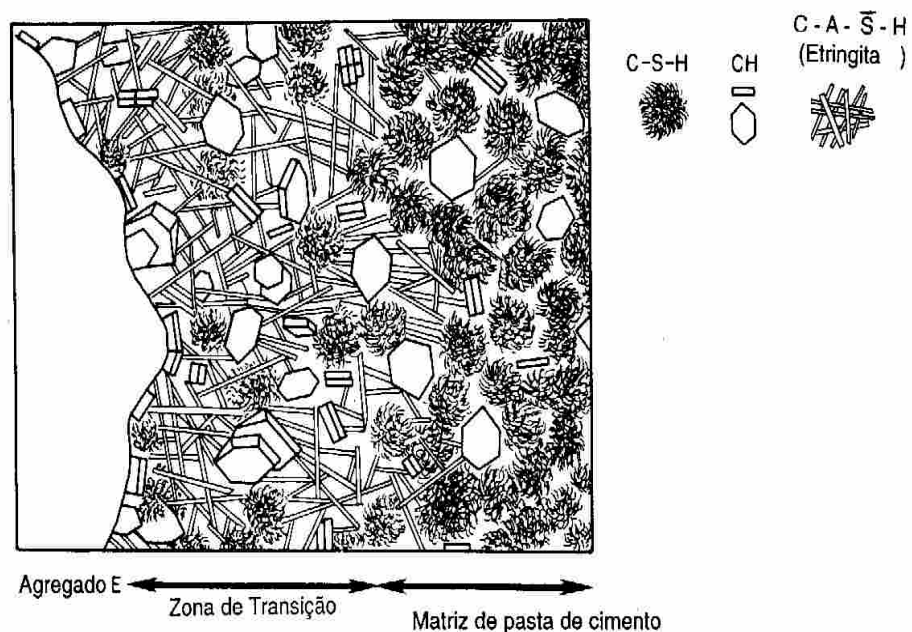


Figura 3.3. Os diferentes cristais e suas concentrações em torno dos grãos dos agregados gráudos, (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Quando se objetiva a produção de CAR ou CAD, há a necessidade de melhorar as características da zona de transição da pasta matriz. Procedimentos que apresentam bom desempenho para isso são a redução da relação água/aglomerante e o uso de adições pozolânicas, em especial a sílica ativa, que provoca na região o efeito microfíler e reações pozolânicas (LIBÓRIO, 2004).

Tendo citadas as fases que compõem o concreto, apresenta-se, a seguir, as características dos materiais que constituem um CAR.

### **3.4 MATERIAIS CONSTITUINTES**

Nesta seção abordam-se as principais características que os materiais constituintes de concreto devem possuir para serem adequados à produção de CAR. O ACI 363R-92 (2001) coloca que os materiais para se produzir um CAR devem atender requisitos que favoreçam à trabalhabilidade e à resistência mecânica, de forma muito mais estrita que os materiais usados em concretos comuns.

Para se obter um CAR, inevitavelmente, são necessários materiais adequados para possibilitar o desempenho desejado. Em DAL MOLIN *et al.* (1997), os autores colocam que existe um consenso sobre algumas características e propriedades dos materiais que favorecem o comportamento das misturas de CAR, permitindo otimizar a resistência mecânica do material. Em AİTCIN (2000) o autor define a seleção dos materiais para os CAR, como uma arte, não como uma ciência pela dificuldade de escolha e dos inter-relacionamentos possíveis. De qualquer forma a maneira mais adequada para se selecionar um material é, dentro das disponibilidades locais a sua experimentação por meio de estudos preliminares e, ainda, estudos com concretos feitos com estes materiais.

#### **3.4.1 CIMENTO**

Trabalhos como MEHTA & AİTCIN (1990b), expõem que não existe um critério claro para a definição de cimento mais apropriado para produzir CAR, no entanto a definição de um cimento adequado é de vital importância, devido a sua influência sobre a resistência da pasta e a aderência dessa com os agregados. A característica primordial do cimento é que deve variar pouco, (ACI 363R-92, 2001).

AİTCIN & ADAM (1995) colocam que o cimento ideal deveria ser não muito fino, com baixo teor de silicato tri-cálcio ( $C_3A$ ) e com a reatividade da fase intersticial facilmente controlada por íons sulfatos derivados da dissolução de sulfatos presentes no cimento.

Segundo o ACI 363R-92 (2001) o silicato tri-cálcio presente não deve variar mais que 4%, a perda ao fogo deve ser inferior a 0,5% e a finura Blaine deve ser superior a  $375 \text{ cm}^2/\text{g}$ . A concentração de sulfato ( $\text{SO}_3$ ) deve variar  $\pm 0,2\%$ , para possibilitar a uniformidade adequada do cimento.

Em MEHTA & AİTCIN (1990a) os autores relatam que cimentos com maiores teores de  $C_3S$  e  $C_2S$  são mais favoráveis para a obtenção de altas resistências mecânicas.

AİTCIN (2000) sugere que com os atuais cimentos Portland, na prática, nos CAD, é mais fácil chegar à resistência pretendida do que controlar a reologia, ressaltando o ponto onde a compatibilidade cimento-aditivo superplastificante é de vital importância para se obter a consistência desejada. É mais provável não se conseguir atingir o abatimento solicitado do que não se atingir a resistência projetada. GUTIÉRRES & CÁNOVAS (1996) narram que a compatibilidade entre o cimento e o aditivo superplastificante é um dos principais fatores para a seleção do cimento.

Outra característica importante, relativa ao cimento, para produzir CAR, é o alto consumo deste por metro cúbico de concreto. Com as baixas relações água/aglomerante características destes concretos, mesmo com o uso de aditivos superplastificantes, os consumos de cimento são altos (comparando com os concretos convencionais) para que possa se aplicar o mínimo consumo de água necessário para se obter a consistência desejada.

NEVILLE (1997), e MEHTA & AİTCIN (1990b) afirmam que os concretos convencionais têm consumos de cimento na faixa de 300 a  $350 \text{ kg/m}^3$ , enquanto os CAR têm consumos variando de 400 a  $550 \text{ kg/m}^3$ . Altos consumos de cimento podem apresentar características indesejáveis devido ao alto calor de hidratação e a excessiva retração, ambos fatores conduzem ao surgimento de fissuras (ACI 363R-92, 2001). A técnica mais interessante para minimizar esses fenômenos é a substituição de parte do cimento por adições suplementares, como a sílica ativa (ACI 363R-92, 2001).



### **3.4.2 AGREGADOS**

As características dos agregados que são importantes para os concretos comuns, passam a ser fundamentais para os CAR. Para a produção de concretos convencionais ( $f_{ck} < 50$  MPa) é relativamente fácil obter agregados, mas quando se objetiva obter CAR, uma melhor seleção passa a ser importantíssima (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Detalhes geométricos dos grãos, como o seu formato, lamelar ou não e a rugosidade superficial destes afetam as propriedades reológicas do concreto fresco.

#### **3.4.2.1 AGREGADOS MIÚDOS**

Agregados miúdos de origem natural, como areias, são ideais para uso em CAR, devido a sua forma arredondada e textura suave. A melhor distribuição granulométrica, no caso, é mais função das necessidades de trabalhabilidade do que de empacotamento físico. Módulos de finura (MF) com valores abaixo de 2,5 tornam o concreto excessivamente viscoso, tornando-o difícil de aplicar (ACI 363R-92, 2001). MEHTA & AİTCIN (1990a) recomendam MF com valor próximo a 3,0, portanto areias mais grossas, que proporcionam uma pequena redução na quantidade de água na mistura para uma mesma trabalhabilidade.

Os agregados devem estar livres de impurezas orgânicas, argilas ou qualquer material deletério e, também, não devem apresentar quantidade excessiva de finos, para que sejam adequados para o uso em concretos (NAWY, 1996). Grandes quantidades de finos não são recomendáveis para a aplicação em CAR, por conterem altos consumos de cimento e adições como a sílica ativa que já preenchem as necessidades de finos (AİTCIN, 2000).

#### **3.4.2.2 AGREGADOS GRAÚDOS**

Como já citado, para o uso em CAR, características como a granulometria, a dimensão máxima característica, o formato e a resistência mecânica dos grãos, são itens importantes para se alcançar o desempenho desejado.

Em seu trabalho, MEHTA & AİTCIN (1990a) afirmam que o diâmetro máximo característico dos agregados graúdos para uso em CAR devem estar entre 10 e 12 mm. Já o ACI 363R-92 (2001) cita que muitos estudos têm mostrado que para a finalidade de maximizar a resistência à compressão de um concreto com alto consumo de cimento e baixa relação água/aglomerante, o diâmetro máximo característico (DMC) do agregado graúdo deve ser fixado entre 9,5 e 12,7 mm, porém agregados com até 19,0 mm, (brita 1), têm sido aplicados com sucesso. No seu trabalho, MENDES (2002) obteve, utilizando agregados com DMC de 25 mm provenientes de granitos, rupturas à compressão com tensões superiores a 100 MPa, aos 28 dias. Com o aumento da tensão, há uma tendência de redução média na aderência pasta/agregado devido ao aumento da área superficial de cada grão individualmente (ACI 363R-92 2001, *apud* CORDON & GILLEPSIE).

Quanto à origem dos grãos, agregados graúdos provenientes de pedra britada têm produzido concretos com resistências à compressão maiores do que com seixos, devido à melhor aderência promovida por partículas angulares (TAYLOR *et al.*, 1996). De qualquer maneira partículas com acentuada angularidade, ou lamelares, devem ser evitadas para que sejam atendidos os requerimentos de trabalhabilidade. Formatos mais próximos do cúbico são os ideais (ACI.363R-92, 1997).

Como os agregados graúdos também têm influência sobre a trabalhabilidade, GUTIÉRRES & CÁNOVAS (1996) em seu trabalho colocam que uma boa seleção para melhorar a consistência de um CAR deve ter como requisitos:

- agregados com baixo coeficiente de absorção, abaixo de 1 %;
- coeficiente de forma em torno ou acima de 0,25;
- DMC de 14 mm é melhor que 12 ou 10 mm.

E, ainda com o enfoque de melhorar a resistência mecânica, sugere-se perda no ensaio de abrasão Los Angeles igual ou inferior a 15%.

Como a ligação mecânica entre a pasta e os grãos dos agregados é um fator limitante para resistências à compressão alta é, também, importante que a mineralogia do agregado permita uma boa aderência, sendo que em geral rochas silicosas têm um bom potencial de aderência (GIACCIO & ZERBINO, 1998).

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos afeta a trabalhabilidade do concreto e, por consequência, altera também os consumos de água de aditivo superplastificante. Alguns métodos de dosagem específicos para CAR, como o de AİTCIN (2000), e o de TORALLES-CARBONARI (1996), utilizam metodologias para otimizar o esqueleto granular por meio da composição granulométrica ideal da mistura dos agregados graúdos e miúdos, visando obter bons desempenhos do concreto nos estados fresco e endurecido (TORALLES-CARBONARI, 1997). MARTINS *et al.* (2004), analisou a otimização do esqueleto granular para CAR concluiu que com essa metodologia se consegue melhoras de até 15% na resistência à compressão nas primeiras idades.

### **3.5 ADIÇÕES MINERAIS**

As adições minerais são de elevada importância para a produção de CAR por possibilitar melhorias nas suas características técnicas. Com a aplicação destes materiais de forma adequada, pode-se alcançar, também, benefícios ao concreto fresco, quanto para o concreto endurecido, tais como:

- aumento da coesão e a diminuição da segregação e da exsudação;
- aumento de resistências à compressão, tração e abrasão;
- redução da retração e da porosidade, minimizando a permeabilidade e aumentando a durabilidade;
- melhora na resistência às reações álcali-agregado (dependendo da quantidade aplicada) e contra o ataque por sulfatos.

Estes materiais podem ser incorporados ao CAR como adições ao material cimentante ou como substituição de parte do cimento.

As adições mais usuais em concretos de elevada resistência são as pozolânicas, em especial a sílica ativa, as cinzas volantes e as argilas calcinadas (AİTCIN, 2000). Estas são interessantes para a produção de CAR devido a sua ação pozolânica (transforma o hidróxido de cálcio em estruturas C-S-H) e o efeito filer (preenche os vazios da microestrutura) (LIBÓRIO, 2004).

### 3.5.1 SÍLICA ATIVA

A sílica ativa, um subproduto da fabricação do silício metálico, é uma adição que melhora as propriedades do concreto tanto no estado fresco como no endurecido, (em especial concretos com baixa relação água/aglomerante) (AİTCIN, 2000). Esta adição contém de 85% a 98% de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) amorfo, suas partículas são obtidas a partir da condensação do gás residual da redução da sílica, têm forma esférica e são microscópicas (AİTCIN, 2000). O diâmetro médio das partículas primárias é de 0,10 a 0,15  $\mu\text{m}$ , equivalente às partículas sólidas da fumaça de um cigarro, a sílica ativa possui uma área específica extremamente elevada, da ordem de 20.000  $\text{m}^2/\text{kg}$ , aproximadamente, 100 vezes maior que a do cimento (AİTCIN, 2000). MEHTA & MONTEIRO (1994) dizem que quanto mais fino o aditivo mineral, menor a quantidade de água necessária para aumentar a coesão e a trabalhabilidade de um concreto recém misturado.

A ação da sílica ativa é, primeiramente baseada em suas propriedades químicas, como o efeito pozolânico, em que a sílica ativa reage com os íons de hidróxido de cálcio da solução alcalina que a envolve, formando como produto desta reação estruturas C-S-H semelhantes às resultantes da hidratação dos silicatos presentes no clínquer de cimento (ACI 363R-92, 2001). Em segundo lugar, é também baseada na propriedade física do efeito microfíler, as partículas da sílica ativa introduzem-se facilmente, quando bem defloculadas pelo superplastificante, nos espaços entre os grãos de cimento. Isto faz com que se reduza o espaço disponível para a água atuando como pontos de nucleação de produtos da hidratação do cimento. O efeito microfíler também é o responsável pelo aumento da fluidez em concretos com baixa relação água/aglomerante baixa (AİTCIN, 2000).

Estas propriedades têm as seguintes conseqüências sobre as características do concreto fresco ou endurecido segundo MEHTA & MONTEIRO, (1994):

- aumento da resistência à compressão e à tração;
- aumento da coesão com menor segregação e exsudação;
- redução da permeabilidade e da porosidade;
- aumento da durabilidade do concreto;

- aumento da resistência à abrasão.

A presença de sílica ativa na pasta de cimento, também, torna o concreto menos susceptível às reações álcali-agregado, por reagir antes com os álcalis presentes na pasta de cimento ( $K_2O$  e  $Na_2O$ ) do que os constituintes silicosos reativos dos agregados, (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Salienta-se que o resultado desta ação é controverso.

É muito difícil se obter concretos com resistências à compressão superiores a 59 MPa aos 56 dias sem o uso de sílica ativa (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Tentativas

nesse sentido implicam consumos de cimento muito elevados com inevitáveis problemas como excessivo calor de hidratação e grande retração.

Substituindo-se parte do cimento em um concreto com a simples adição da sílica ativa, mantendo a relação água/aglomerante, obtém-se um aumento substancial na resistência à compressão com economia (BHARATKUMAR *et al.*, 2001).

Com o uso de sílica ativa, os pontos fracos como bolsas de água, devido à exsudação interna sob agregados ou armaduras, são minimizados ou eliminados favorecendo a resistência mecânica do concreto (AÏTCIN, 2000, *apud* GOLDMAN & BENTUR, 1989).

Outros pontos importantes na melhoria das características do concreto causados pela adição de sílica ativa são a menor porosidade e a elevada aderência da pasta de cimento e o aumento do módulo de elasticidade do concreto (SHRP, 1996).

### **3.5.2 CINZAS VOLANTES**

As cinzas volantes são o resíduo da queima de carvão mineral em pó, proveniente de fornos que usam carvão mineral moído como combustível. O pó, bastante nocivo ao meio ambiente, é coletado por filtros de mangas ou filtros eletrostáticos.

A maior parte das partículas das cinzas volantes são esferas sólidas com 20  $\mu m$  de diâmetro médio, comumente 200 a 300  $m^2/kg$  de finura Blaine, possuindo em sua composição 60 a 85% de vidro, e 10 a 30% de compostos cristalinos e até cerca de 10% de carvão não queimado (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

O grau de reatividade de cada cinza volante, que tem como efeito à velocidade de ganho da resistência mecânica, além da sua composição química, também depende da sua granulometria, características da superfície e morfologia dos grãos. As características geométricas dos grãos, citadas anteriormente, também influem na trabalhabilidade do concreto. O ACI 234R-96 (2001) salienta que variações nas propriedades físicas ou químicas destas adições podem causar variações apreciáveis nas propriedades dos CAR, portanto, é extremamente importante que estas sejam bem testadas e que tenham sua uniformidade assegurada antes do seu uso.

As cinzas volantes são menos reativas quando comparadas com a sílica ativa, mas têm efeito sobre o concreto no estado plástico por favorecer a trabalhabilidade devido a retardar o início de pega com redução da quantidade de reações de hidratação enquanto o concreto está fresco (MEHTA & MONTEIRO, 1994), e, principalmente, efeitos sobre o concreto endurecido, como:

- retardar a velocidade do ganho de resistência mecânica. Nas primeiras idades a resistência mecânica fica prejudicada devido à baixa velocidade das reações pozolânicas, posteriormente, a resistência alcançada se iguala e até ultrapassa a do clínquer hidratado. Em MEHTA & MONTEIRO (1994), os autores descrevem que nas quantidades comumente empregadas, muitas cinzas volantes de baixo teor de cálcio tendem a reduzir as resistências iniciais até 28 dias, mas melhorar as resistências últimas;
- reduzir o calor de hidratação devido a ele ser menor e melhor distribuído ao longo do tempo, comparando-o ao calor liberado pelo clínquer ao hidratar;
- minimizar a permeabilidade do concreto por fatores tais como o efeito das reações pozolânicas fixar o hidróxido de cálcio minimizando sua solubilidade, minimizar a retração e o aparecimento de microfissuras por contração térmica pelo menor calor de hidratação;
- diminuir a possibilidade da ocorrência das reações álcali-agregados. A sílica das cinzas volantes reage e fixa os álcalis antes destes reagirem com a fração silicosa dos agregados.

Os teores ideais da adição de cinzas volantes estão entre 15 e 25% da massa de cimento, sendo que no Brasil a maior fração do uso destas adições é na forma do uso de cimentos com adição de cinzas volantes, dos tipos CP-II-Z ou CP-IV.

Embora o cimento tipo CP-II seja o produto mais usual encontrado na forma ensacada no mercado na região de Curitiba para a produção de concreto em centrais, o cimento tipo CP-V-ARI, a granel, é unanimemente aplicado (anteriormente era o CP-I, mas as cimenteiras não mais os produzem). Um levantamento feito pelo presente trabalho constatou que, devido à pouca disponibilidade e variabilidade excessiva da adição, atualmente, não há nenhuma central dosadora de concreto da região de Curitiba que adicione cinza volante ao seu produto. Mediante esta constatação, entende-se não ser interessante o uso de cinzas volantes nesta pesquisa.

### **3.6 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE**

Em concretos, a combinação de um limite superior para a quantidade de cimento e de um limite inferior para a o consumo de água, teria como significado que, sem a aplicação de aditivos superplastificantes, seriam impraticáveis relações água /aglomerante abaixo de 0,4 (AİTCIN & ADAM, 1995).

Segundo o ACI 363R-92 (2001), o uso desta classe de aditivos tem aumentado muito em vários segmentos da indústria do concreto, pois eles podem aumentar significativamente o abatimento sem a adição de água, tratando-os por “aditivos redutores de água de amplo alcance” (HRWRA, *high-range water-reducing admixture*).

Nos anos 70, estes aditivos eram quase exclusivamente compostos por melanina sulfonada e naftaleno sulfonado condensado com formaldeído, chamados atualmente de aditivos de primeira geração. Hoje se encontram disponíveis novas gerações de aditivos, como por exemplo: lignossulfonados, condensado formaldeído do ácido naftalenosulfônico, condensado formaldeído de melanina sulfonada, éster policarboxílicos, etc. (LIBÓRIO, 2004).

Como a interação dos superplastificantes na hidratação do cimento Portland é complicada, não existe, atualmente, uma teoria amplamente aceita para explicar todos os pormenores da ação. Sabe-se, porém, que estes aditivos interferem não apenas com a hidratação do cimento mas, também, com os sulfatos em dissolução, podendo causar perda de abatimento e até pega instantânea (AİTCIN, 2000).

Parâmetros como a relação água/aglomerante, a temperatura, a finura do cimento, a composição do cimento e eficiência da mistura atuam sobre a compatibilidade entre o cimento e o superplastificante, afetando o resultado final de trabalhabilidade da pasta (AİTCIN, 2000).

A aplicação desses aditivos em CAR pode requerer o uso de procedimentos que não são comuns em concretos convencionais. Com o seu uso ocorrem situações como relatadas no ACI 363R-92, (2001):

- aumento da pressão do concreto sobre as formas devido a sua maior fluidez;
- rápida perda de abatimento devido ao limitado tempo de eficiência de muitos tipos destes aditivos, em especial em concretos sob temperatura elevada. Os superplastificantes a base de poliacrilatos tendem sofrer menos este efeito;
- tempo curto para a aplicação do concreto, devido ao limitado período de eficiência do superplastificante pela perda de abatimento; e
- segregação dos componentes do concreto se a quantidade aplicada do aditivo for excessiva ou se este for inadequadamente misturado ao concreto.

Considerando o problema da perda de abatimento, MEHTA & MONTEIRO (1994), concluem que grandes aumentos de abatimento de concretos com superplastificantes podem ser mantidos, durante várias horas, por meio de dosagens repetidas de superplastificantes.

### **3.6.1 COMPATIBILIDADE CIMENTO-ADITIVO**

Concretos com altos consumos de cimento, com relações água/aglomerante baixas, consumos de água também relativamente baixos, são dosagens típicas em um CAR, freqüentemente, ainda, com o uso de sílica ativa, nesses contextos, ocorre um comportamento inesperado entre estas combinações, levando a uma rápida perda de abatimento. O ACI 363R-92 (2001) cita que a perda de abatimento em concretos que usam superplastificantes pode ter origem no tipo do aditivo, na dosagem aplicada, na aplicação simultânea de aditivos diferentes, nas adições minerais, no tipo do cimento, na classe e temperatura do concreto.



NEVILLE (1997) afirma que é fundamental encontrar a combinação adequada entre o cimento e o aditivo para que se alcance, com a fluidez requerida, um maior período de tempo do concreto. AİTCIN (2000), relata que até o momento é impossível saber, possuindo somente as especificações do cimento e do superplastificante, que tipo de comportamento reológico pode-se esperar dos traços com baixa relação água/aglomerante, sugerindo que sejam feitos ensaios preliminares com pastas de cimento e aditivo para determinação de combinações mais eficientes. Dados experimentais de ensaios de fluidez de pasta de cimento com aditivo, mostram que o tempo de fluidez decresce com a elevação da relação água/aglomerante e com o aumento da dosagem do aditivo superplastificante SILVA & VASCONCELOS (2002).

Os dois métodos mais usados para a análise de pastas são o método do funil de Marsh (NBR 7682, 1983) e ensaio de miniabatimento de Kantro (AİTCIN, 2000 *apud* KANTRO, 1980).

O método do funil de Marsh consiste na verificação da fluência da pasta, pelo tempo de que ela necessita para escoar em um funil padronizado. Com este ensaio é possível, além da verificação da compatibilidade cimento-aditivo, determinar, também, a dosagem ótima do aditivo, tendo como base o “ponto de saturação” da pasta com este. AİTCIN (2000) cita que esta é a dosagem máxima, a partir da qual não se consegue aumento no abatimento do concreto, podendo ser usada como limite superior. TORALLES-CARBONARI *et al.* (2003), analisam o desempenho de pastas pelo funil de Marsh e colocam que este ensaio é confiável, de fácil execução e econômico.

O ensaio de miniabatimento de Kantro, que é muito mais sensível que o ensaio de abatimento (KANTRO, 1980), consiste em medir o espalhamento da pasta sobre uma placa de vidro a partir do preenchimento de um “minicone”. Por este ensaio é possível avaliar o poder fluidificante do aditivo e as perdas de fluidez da pasta com o passar do tempo. O ensaio é eficiente para a seleção de aditivo com maior ação fluidificante, embora não indique o seu teor ideal de dosagem pela presença de outros sólidos (DAL MOLIN, 1995 *apud* RAABE, 1991).

Esses estudos de compatibilidade são importantes para os CAR devido a problemas técnicos que o excesso de aditivo pode vir a causar, como a segregação, o excesso de incorporação de ar e o retardo de pega. Outro fator não menos importante é o custo destes aditivos, cinco a dez vezes superior ao dos plastificantes simples; portanto, sua otimização reduz de forma significativa o custo do metro cúbico do concreto.

### **3.7 ÁGUA DE AMASSAMENTO**

Segundo a NBR 6118 (2003) e o ACI 363 R-92 (2001), a água para uso em concretos de alta resistência deve seguir os mesmos requisitos aplicáveis para concretos convencionais. Essas normas colocam que em geral a água de amassamento deve ser potável e originária das redes de abastecimento público. Existindo a necessidade de se utilizar uma água sobre a qual pairam dúvidas quanto à qualidade, o ACI 363 R-92 (2001) recomenda alguns testes comparativos entre o concreto feito com a água duvidosa e outro, com água destilada.

#### **4. PRODUÇÃO, CONTROLE DE QUALIDADE E PROPRIEDADES DOS CAR**

A produção e as propriedades dos CAR não são significativamente diferentes dos concretos convencionais, portanto, o objetivo deste trabalho é justamente ajudar a reduzir as diferenças ao mínimo possível.

##### **4.1 PRODUÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE**

Não é difícil produzir CAR, usando aditivos superplastificantes e sílica ativa, com alta trabalhabilidade e boa estabilidade (TAYLOR *et al.*, 1996). Estudo publicado em MENDES (2002), com agregados da região de Curitiba, usuais por centrais de concreto, prova que é perfeitamente possível a produção de CAR com estes componentes. As restrições para a produção de CAR pelas empresas de concreto pré-misturado são mais culturais do que efetivamente técnicas.

Como já referido anteriormente neste trabalho, com relação aos materiais para a produção de CAR, o processo de produção também deve sofrer maior controle de qualidade.

Para a produção de CAR é fundamental o controle preciso da quantidade de água aplicada, visando o controle absoluto sobre a relação água/aglomerante, isto implica em um cuidadoso controle da umidade dos agregados e até a consideração da água que acompanha os aditivos (ACI 363 R-92, 2001).

Da mesma forma, é importante o conhecimento da eficiência do misturador e o controle da sequência de mistura mais adequada, já que a trabalhabilidade e a perda de abatimento de um CAR variam conforme o processo de mistura (KAKIZAKI *et al.*, 1992). PING & YAW (2001), declaram que, considerando um tempo suficiente para a mistura, um CAD com alto consumo de água (200 kg/m<sup>3</sup>) não tem suas características muito afetadas pelo tipo do misturador; já para CAD com consumo mais baixos, a sequência e a eficiência do misturador são significativas.

Outro fator que interfere nas características reológicas do concreto fresco e até sobre a resistência à compressão é a sequência dos materiais na betoneira. A eficiência do aditivo superplastificante varia com o instante de aplicação, se ele é colocado em contato com os agregados ou com o cimento antes da água de amassamento, os grãos secos absorvem o aditivo para o seu interior diminuindo muito seu efeito sobre a plasticidade, (KAKIZAKI *et al.*, 1992). DAL MOLIN *et al.* (1997), *apud* COLLEPARDI (1994) confirma que o superplastificante age mais efetivamente se adicionado alguns minutos após a água de amassamento. Adicionado-o um minuto depois da água, foram observados resultados com abatimentos 100% superiores, por outro lado, intervalos maiores que 5 minutos resultam em perda de abatimento. ARAUJO *et al.* (2001) em seu estudo, obtiveram aumentos de até 19% na resistência à compressão nas primeiras idades, pela colocação do aglomerante, adição, água e metade dos aditivos antes dos agregados. No mesmo estudo, aos 28 dias, a diferença na resistência, praticamente desapareceu. Esta sequência tem como dificuldade a necessidade de remover o material em pó que fica aderido às paredes da betoneira, parando-a durante o processo de mistura, ação impraticável em uma central de concreto.

## **4.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO**

Para que se produza um CAR é necessário que ele possua características e propriedades que permitam adequada aplicação e utilização. Por esta razão seguem as definições mais importantes para estados fresco e endurecido desse material.

### **4.2.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO**

A trabalhabilidade e a consistência adequadas para um CAR são mais significativas do que para um concreto convencional, pois em peças estruturais que apresentem, depois da desforma, vazios ou preenchimento com material segregado, são mais difíceis de se corrigir quanto mais alta for a resistência do concreto utilizado. AÍTCIN (2000) refere que um concreto cujas características no estado fresco são bem controladas, provavelmente, se apresentará bem depois de endurecido.

O controle das propriedades do concreto fresco é importante devido aos requerimentos de lançamento e adensamento. A trabalhabilidade e o ar incorporado são duas variáveis de controle importantes.

#### **4.2.1.1 TRABALHABILIDADE**

A trabalhabilidade de um concreto é um conceito que identifica a menor ou maior aptidão deste material para ser empregado sem perda de homogeneidade (PETRUCCI, 1971).

Para a produção de CAR, materiais especialmente caracterizados por relações água/aglomerante baixas e consumos de superplastificantes altos, as perdas na trabalhabilidade podem ser bem mais rápidas que para os concretos convencionais.

Sobre a trabalhabilidade inicial e a perda de abatimento, influem significativamente as propriedades dos materiais constituintes do concreto, como as compatibilidades entre eles, o procedimento de mistura (muito importante) e em particular, o momento para a adição do superplastificante. Com a aplicação de sílica ativa, cresce muito a superfície específica dos sólidos presentes no sistema. A quantidade de superplastificante aplicada também é um fator importante (PUNKKI *et al.*, 1996). Deve, igualmente, ser dispensada a atenção para a seleção dos agregados e o procedimento de dosagem para se alcançar o abatimento requerido (ACI 363 R-92, 2001).

Com o intuito de aumentar a trabalhabilidade do concreto AİTCIN (2000) sugere o uso de aditivos incorporadores de ar, embora a presença das bolhas de ar possam vir a prejudicar a resistência à compressão, citando um exemplo de produção de concreto com 4,5% de ar incorporado que atingiu 100 MPa de resistência à compressão aos 91 dias.

#### **4.2.1.2 AR INCORPORADO**

Concretos convencionais contém no seu interior, mesmo sem o uso de aditivos para este fim, um a três por cento do seu volume em ar aprisionado, devido ao processo de mistura e a sua consistência.

As bolhas de ar aprisionado desta maneira têm um diâmetro médio de, aproximadamente, dois milímetros (MEHTA & MONTEIRO, 1994). Em CAR, com relações água/aglomerante abaixo de 0,30, é difícil se obter teores de ar aprisionado inferiores a 2% AİTCIN (2000). A quantidade de ar distribuído no concreto varia em função da velocidade e eficiência dos misturadores (KAKIZAKI *et al.*, 1992).

A aplicação de aditivos incorporadores de ar ao concreto torna possível inserir percentuais de ar bem superiores, atingindo até 5% do volume total. As bolhas adquiridas, desta forma, são pequenas, em torno de 0,2 mm, e contribuem muito para a trabalhabilidade do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994). AİTCIN (2000) atesta que esta forma de incorporação de ar é recomendável para concretos nos quais é difícil de se alcançar a trabalhabilidade requerida, mesmo que esta incorporação provoque alguma perda de resistência. O ACI 363 R-92 (2001) sugere que devido ao efeito de redução da resistência à compressão, especialmente sobre os CAR, os agentes incorporadores de ar não devem ser utilizados, a não ser por preocupações com a durabilidade (efeito gelo-degelo).

#### **4.2.2 PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO**

Para as propriedades dos concretos como a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade são, frequentemente, montadas expressões que representam genericamente o seu comportamento, sendo essas baseadas em dados experimentais.

##### **4.2.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO**

A resistência à compressão é a característica dos concretos mais significativa para a engenharia de estruturas. Sua especificação é de primordial importância tanto para o dimensionamento da estrutura como para a dosagem do material.

O levantamento da resistência à compressão é feito por meio de ensaio relativamente simples de compressão uniaxial sobre corpo-de-prova cilíndricos, geralmente com dimensões de 15 x 30 cm ou 10 x 20 cm (NBR 5738, 2003), especificados no Brasil pela NBR 5739 (1994).

Para ensaios sobre concretos com resistências mais altas, devido a limitações da capacidade das prensas, são mais usados os corpo-de-prova (10 x 20) cm.

A partir de resultados dos ensaios de compressão são traçados os diagramas que relacionam as tensões com as deformações e são, usualmente, desenvolvidas expressões que correlacionam os resultados à compressão com outras propriedades do concreto, como a resistência à tração e o módulo de elasticidade. Inclusive uma determinação da durabilidade de uma estrutura de concreto, quanto à possibilidade de corrosão das armaduras, da lixiviação ou da formação de produtos expansivos, pode ser feita a partir da sua classe de resistência determinada pela NBR 8953 (1992), HELENE (1997b).

O mais significativo objetivo dos ensaios à compressão são os resultados aos 28 dias, idade mais importante para se obter a resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ), mas informações sobre a evolução da resistência à compressão com a idade também são obrigatórias para um CAR.

Para CAR, o procedimento de cura, é fundamental, pois é responsável por manter a água necessária à hidratação do cimento durante o endurecimento do concreto, pois uma perda muito rápida desta água, que já é pouca devido à baixa relação água/aglomerante, pode afetar a resistência mecânica e causar grande retração (AİTCIN, 2000 e ACI 363 R-92, 2001). Embora exista ainda um debate científico a cerca da maneira de proceder à cura sobre corpos-de-prova, para melhor simular um CAR em uma estrutura real, a maneira mais convencional é a imersão deles em água (AİTCIN, 2000).

Os resultados dos ensaios à compressão também podem vir a ser afetados por uma má distribuição ou excentricidade da carga proveniente da prensa sobre a superfície do corpo-de-prova, concentrando tensões em frações da superfície (NEVILLE, 1997). Por este motivo, há necessidade de se assegurar que esta transmissão seja feita da melhor forma possível.

Para ensaios à compressão em CAR são usadas prensas com cabeças esféricas, para minimizar o crítico problema do paralelismo entre as faces e diversas técnicas para regularizar os topos dos corpos-de-prova (AİTCIN, 2000). Muito utilizado e eficiente sobre concretos convencionais, o capeamento com enxofre (MENEGHETTI *et al.*, 2001) normalmente é inadequado para uso com resistências maiores (AİTCIN, 2000).

Para CAR, comumente, aplicam-se algumas técnicas específicas, como a colocação de anéis metálicos preenchidos discos de neoprene ou poliuretano nos topos, discos estes que têm reutilização muito limitada e a retificação por desgaste dos extremos dos corpos-de-prova (AÏTCIN, 2000).

#### **4.2.2.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE**

O concreto é um material composto e as suas fases distintas agregado e pasta apresentam módulos de elasticidade individuais e diferentes. O módulo da pasta é função da relação água/aglomerante; já o módulo dos agregados varia devido a composição mineral (ROJAS & PINTO, 2004). Nos concretos convencionais, a proporção do traço influencia o valor do módulo, porque a que os agregados, em geral, representam a maior parte do volume da mistura; então, o módulo destes é o mais significativo na sua composição. Já em CAR, pelo fato das pastas possuírem poucos vazios, é menor a diferença do comportamento elástico das fases, fato que contribui para uma menor tendência à microfissuração do material.

Na ausência de valores medidos por ensaios, as Normas e a bibliografia existentes, em geral, fornecem correlações para estimativas do módulo de elasticidade a partir do  $f_{ck}$  e tensões de ruptura à compressão. Um ponto de atenção é que as equações para a estimativa do módulo que são válidas para concretos convencionais apresentam problemas quando a resistência à compressão aumenta.

Segundo o ACI 363 R-92 (2001), muitos pesquisadores têm relatado valores para o módulo de elasticidade de CAR da ordem de 31 a 45 GPa, variando principalmente devido a diferentes métodos para determinação, ver a Figura 4.1.

A comparação destes módulos determinados experimentalmente com os previstos pela expressão dada pelo ACI 318-99 (2001), para concretos convencionais, resulta em valores superestimados para o módulo de elasticidade para valores superiores a 41 MPa.



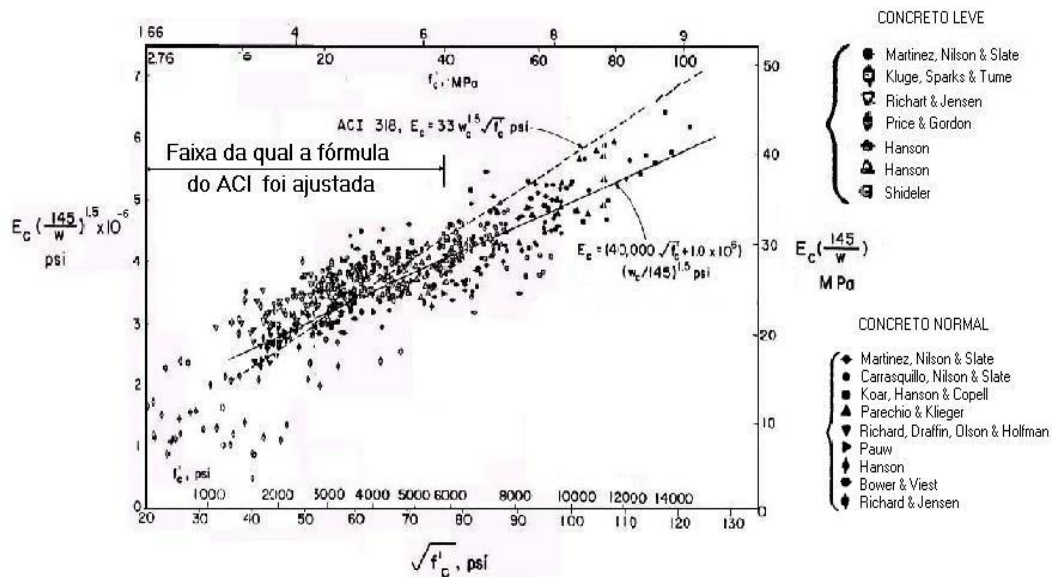


Figura 4.1. Gráfico com equação sugerida pelo ACI 363 R-92 (2001) e os resultados obtidos por várias pesquisas e faixas de resistências.

A NBR 6118 (2003), para  $f_{ck}$  inferiores a 50 MPa, com o objetivo de estimar o módulo de elasticidade secante, é dada pela correlação descrita na Equação (4.1). O ACI 363 R-92 (2001), apud RUSSEL & CORLEY (1978), SALCIER *et al.* (1965) e PFEIFFER (1971), para o  $E_{cs}$  cita como exemplo a Equação (4.2), para resistências à compressão de 21 a 83 MPa. No código MC-90, CEB/FIP (1990), para resistências à compressão abaixo de 80 MPa, existe a Equação (4.3).

$$E_{cs} = 4760 \cdot f_{ck}^{1/2} \text{ MPa} \quad (4.1)$$

$$E_{cs} = 3320 \cdot f_c^{1/2} + 6900 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

$$E_{cs} = 8500 \cdot (f_c + 8)^{1/3} \text{ MPa} \quad (4.3)$$

Onde:

$E_{cs}$ , é o módulo de elasticidade secante,

$f_{ck}$ , é a resistência característica,

e  $f_c$ , é a resistência à compressão do concreto.

Em seu trabalho ROJAS & PINTO (2004) mostram as curvas que, pelas fórmulas propostas por cinco normas internacionais, representam as correlações entre o módulo de elasticidade secante e o  $f_{ck}$ , (ver na Figura 4.2).

É importante observar que, como o módulo de elasticidade é dependente do módulo dos agregados, desvios das equações são muito prováveis (ACI 363 R-92, 2001).

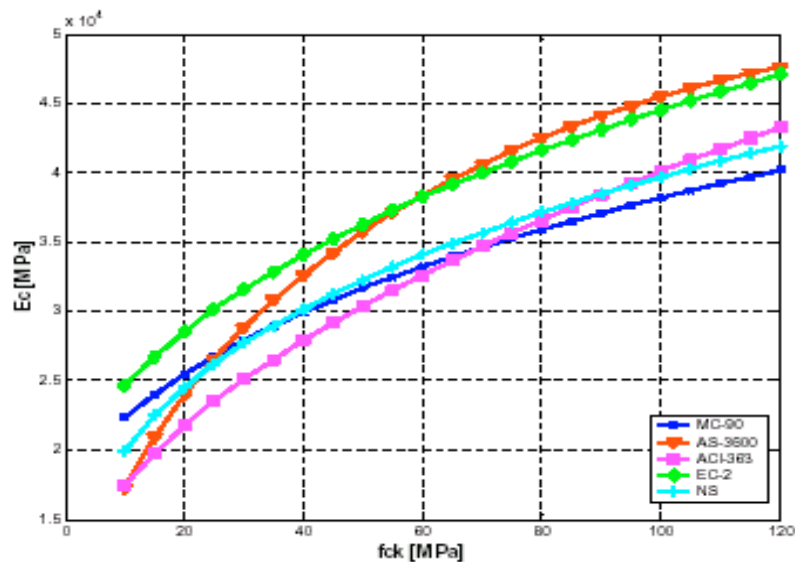


Figura 4.2. Correlações dos  $E_{cs}$  com os  $f_{ck}$  (ROJAS e PINTO, 2004).

#### 4.2.2.3 RETRAÇÃO E FLUÊNCIA

A retração e a fluência são fenômenos que levam o concreto a ter deformações com a passagem do tempo são motivos de preocupação por parte dos projetistas de estruturas, por estes necessitarem prever valores aproximados para estas deformações. O concreto exibe deformações elásticas somente sobre carregamentos de curta duração, e, devido às deformações adicionais decorrentes da retração e fluência desenvolvidas lentamente, o efetivo comportamento do concreto é não-elástico e dependente do tempo.

O fenômeno da retração no concreto é a saída da água dos vazios capilares existentes na pasta. A quantidade de retração é proporcional ao volume de água utilizado no concreto. Basicamente, os CAR, têm retração semelhante a um concreto convencional, mas o com uso de superplastificantes é possível minimizar a quantidade de água e da retração (ACI 363R-92, 2001). A retração em CAR, devido ao seu alto consumo de cimento e baixo consumo de água, difere da que ocorre nos concretos convencionais, manifestando-se, principalmente, nas seguintes formas da retração plástica, que acontece ainda com o concreto no estado fresco; da retração por secagem, que acontece com a saída da água do concreto endurecido; e da retração autógena, decorrente da auto-dessecação pela hidratação dos cimento, significativa em concretos com relação água/aglomerante baixa (SHRP, 1996).

Fluência é o fenômeno de redução de dimensões de uma peça de concreto que ocorre pela exposição desta a uma tensão constante. A fluência acontece devido a presença de vazios na pasta de cimento endurecida, é estreitamente relacionada com a retração e sua intensidade depende primariamente da intensidade da tensão mas, também, é influenciada pela composição do concreto e sua relação água/aglomerante (SHRP C 205, 1996). O ACI 209R-92 (2001) declara que a fluência em concretos que utilizam aditivos superplastificantes é bastante reduzida, sendo muito menor nos CAR, que nos concretos convencionais, considerando-se ambos sob a mesma tensão e com a mesma idade. O mesmo documento do ACI cita que não existem relatos sobre problemas de fluência em pilares moldados com CAR. O SHRP C 205 (1996) coloca que estudos realizados em vigas experimentais observaram menores deformações por fluência em peças confeccionadas com CAR do que nas com concreto convencional.

## **5. METODOLOGIA**

Neste capítulo é apresentada a metodologia usada para o desenvolvimento do trabalho, iniciando-se pelas descrições materiais usados, seguida da exposição dos métodos de dosagem e sua aplicação.

### **5.1 MATERIAIS UTILIZADOS NO PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Para a seleção dos materiais utilizados nos experimentos deste trabalho, procurou-se aplicar o critério de selecionar aqueles de uso diário para a produção de concreto convencional pelas principais concreteiras da região que apresentaram bom desempenho no trabalho de MENDES (2002).

As características técnicas do cimento, sílica ativa e aditivo superplastificante foram fornecidas pelos fabricantes. A caracterização dos agregados e a verificação da compatibilidade aditivo/cimento foram feitas nas instalações do LAME/LACTEC, como se apresenta a seguir.

#### **5.1.1 CIMENTO**

Em virtude desta pesquisa procurar estar o mais próximo possível do mercado local de concreto, utilizou os mesmos materiais das principais concreteiras da região, o cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI NBR 5733 (1991), usado para os concretos convencionais, foi escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa. Esse cimento tem suas características apresentadas nas Tabela 5.1 e 5.2, cujos dados foram fornecidos pelo fabricante segundo as médias do mês em que o material foi provido, outubro de 2004.

O CP V-ARI tem alta reatividade em baixas idades em função do grau de moagem a que é submetido. O clínquer é o mesmo utilizado para a fabricação de um cimento convencional, mas permanece no moinho por um tempo mais prolongado. O cimento continua ganhando resistência até os 28 dias, atingindo valores mais elevados que os demais, proporcionando maior rendimento ao concreto.

É largamente utilizado para produção de concreto em centrais. Contém adição de até 5% de filer calcário e não possui adição de pozolanas. (Fonte: Fabricante).

Tabela 5.1. Características físicas do cimento CP V-ARI utilizado. (Fonte: Fabricante)

<b>ENSAIOS FÍSICOS CP V-ARI</b>	<b>Valores médios (10/2004)</b>	<b>Especific. ABNT</b>	<b>Normas</b>
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4.516	3000	NBR NM 76
Tempo de início de pega (min)	144	60	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (min)	180	600	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	0,10	8,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	1,07	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	0,50	5,0	NBR 3435
Consistência normal (%)	29,80	-	NBR NM 43
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,14	-	
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	25,00	14,0	NBR 7215
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	35,6	24,0	NBR 7215
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	42,0	34,0	NBR 7215
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	49,6	-	NBR 7215

Tabela 5.2. Características químicas CP V-ARI utilizado. (Fonte: Fabricante).

<b>ENSAIOS QUÍMICOS - CP V-ARI</b>	<b>Valores médios (10/2004)</b>	<b>Especific. ABNT</b>	<b>Normas</b>
Perda ao fogo (%)	3,46	4,5	NM 18
Resíduo insolúvel (%)	0,76	1,0	NM 15
Trióxido de enxofre - SO <sub>3</sub> (%)	3,10	3,5	NBR 5745
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	1,31	-	NBR 5748
Óxido de magnésio - MgO (%)	4,85	6,5	NM 21
Óxido de alumínio – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,40	-	NM 21
Óxido de silício – SiO <sub>2</sub> (%)	18,55	-	NM 21
Óxido de ferro – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,66	-	NM 21
Óxido de cálcio - CaO (%)	60,11	-	NM 21
Equivalente alcalino (%)	0,59		

### 5.1.2 AGREGADOS

O critério de seleção para os agregados utilizados nesta pesquisa foi, dentro dos materiais utilizados correntemente pelas concreteiras locais, os que geraram bons resultados no trabalho de MENDES (2002). Os ensaios para sua caracterização foram feitos nas instalações do LAME/LACTEC. Os resultados destes estão apresentados no item sobre os ensaios preparatórios.

Utilizou-se como agregado miúdo, uma areia natural proveniente do rio Iguaçu, extraída na região metropolitana de Curitiba, mostrada na Figura 5.1, a mesma utilizada em MENDES (2002). O agregado graúdo selecionado foi uma brita nº 1, proveniente de granito da região metropolitana de Curitiba, mostrado na Figura 5.2, é utilizado por diversas centrais de concreto locais. Este agregado foi avaliado em MENDES (2002), com melhor resultado sobre amostras de calcário e diabásio disponíveis na mesma região.



Figura 5.1. Areia utilizada na pesquisa.



Figura 5.2. Brita nº1 utilizada na pesquisa.

### 5.1.3 ADIÇÕES MINERAIS

Com o intuito de acompanhar a tendência dos produtores regionais de concreto, optou-se, neste trabalho, por utilizar uma única adição mineral, a sílica ativa, cuja descrição e características encontram-se a seguir.

#### 5.1.3.1 SÍLICA ATIVA

A sílica ativa, pó fino de cor cinza clara, própria para aplicação em concretos e argamassas, cujas características são definidas pela NBR 13957 (1997), é utilizada nesta pesquisa como substituição a 8% da massa do aglomerante tem suas características fornecidas pelo fabricante conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Características da sílica ativa utilizada. (Fonte: Fabricante)

Superfície Específica	20.000 m <sup>2</sup> /kg
Massa Específica	2,22 g/cm <sup>3</sup>
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio	0,2 µm
Teor de SiO <sub>2</sub>	Min. 85%
Equivalente alcalino em Na <sub>2</sub> O	Max. 0,5%

#### 5.1.4 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

O aditivo superplastificante utilizado neste trabalho é de terceira geração e está com suas características técnicas apresentadas na Tabela 5.4, fornecidas pelo fabricante. Segundo esse o aditivo tem base em uma cadeia de éter carboxílico modificado, é isento de cloretos.

Esse aditivo, segundo o fabricante, é composto por polímeros de éter carboxílico com longas cadeias laterais. No início da mistura, inicia-se o mesmo mecanismo de dispersão eletrostática apresentado pelos aditivos das gerações anteriores, porém, as cadeias laterais unidas à estrutura polimérica geram uma energia que estabiliza a capacidade de refração e dispersão das partículas de cimento.

Com este processo é possível obter-se um concreto fluído com uma grande redução da quantidade de água.

Tabela 5.4. Características técnicas do superplastificante. (Fonte: Fabricante)

Base química	Policarboxilatos
Aspecto e cor	Líquido viscoso marrom
Densidade	1,067 a 1,107 g/cm <sup>3</sup>
pH	5 a 7
Teor de sólidos	28,5 a 31,5%
Viscosidade	95 a 160 cps

Pela da confecção de pastas de cimento com substituição de 8% por sílica ativa com água, com diversos teores deste aditivo, foi feita a verificação da compatibilidade do aditivo com o cimento e adição, testando a fluidez da pasta pelo tempo de escoamento no cone de Marsh, como está descrito no item sobre os ensaios preparatórios.

## 5.2 OS MÉTODOS DE DOSAGEM

Existem muitos métodos de dosagem para concretos, em especial para concretos convencionais. No entanto, ocorrem variações entre os métodos por uma série de motivos diferentes, como as abordagens para otimização dos materiais, metodologias diferentes para se chegar aos volumes dos componentes, seqüências distintas para o proporcionamento dos materiais, métodos que simplificam alguns parâmetros e outros que levam em consideração características bem específicas de alguns materiais.

Especificamente em relação aos CAR, há a necessidade de se adaptar métodos próprios por causa da presença de adições como a sílica ativa (BHARATKUMAR *et al.*, 2001).

Devido às variações regionais dos materiais, faixas de resistência e a presença de diferentes adições e aditivos, não é possível definir um único método que atenda a todas estas combinações para otimizar custos. Além do que, como colocado em AİTCIN (2000), iguais características para o concreto fresco e endurecido podem ser alcançadas com diferentes combinações dos mesmos materiais.



Para se produzir um CAR, há a necessidade de se aplicar aditivos superplastificantes para atingir os requisitos de trabalhabilidade e resistência. O consumo de cimento por metro cúbico de concreto de um CAR produzido por um método específico é bem menor que usando métodos para concretos convencionais ALVES (2000).

Vários métodos de dosagem específicos para CAR têm sido desenvolvidos nos últimos anos, como os métodos de:

- Nawy, (NAWY, 1996);
- Aïtcin, (AÏTCIN, 2000);
- Mehta e Aïtcin, (MEHTA & AÏCTIN 1990b);
- Larrard, (De LARRARD, 1990);
- Domone e Soutsos, (DOMONE & SOUTSOS, 1994);
- Toralles-Carbonari, (TORALLES-CARBONARI, 1996);
- O'Reilly Dias, (O'REILLY DIAZ, 1998);
- IPT/EPUSP modificado, (CREMONINI *et al.*, 2001).

A seguir, são apresentados, mais detalhadamente, os métodos aplicados no presente trabalho, permitindo um panorama geral, para que seja possível uma comparação mais ampla entre eles.

### **5.2.1 MÉTODOS DE DOSAGEM USADOS NO TRABALHO**

Foram escolhidos para o desenvolvimento experimental, somente, três métodos de dosagem, todos próprios para CAR:

- a) *Método MEHTA/AÏTCIN*, (MEHTA & AÏTCIN 1990b);
- b) *Método AÏTCIN*, (AÏTCIN 2000).
- c) *Método IPT/EPUSP modificado*, CREMONINI *et al.* (2001);

O estudo previa, inicialmente, também, a comparação do método TORALLES-CARBONARI (1996), mas, por não ter dado bons resultados em ALVES (2000), assim como algumas características específicas deste método, como a quantidade de traços, consumos de materiais superiores ao disponível e os prazos necessários para os estudos e rupturas, ele não foi comparado nesta pesquisa.

A seguir, para cada um dos métodos escolhidos, estão apresentadas as descrições e sua aplicação dentro do programa experimental.

#### **5.2.1.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO MEHTA/AİTCIN**

Este método, apresentado em MEHTA & AİTCIN (1990b), é projetado para concretos com resistência à compressão dentro do intervalo de 60 a 120 MPa e assume que os agregados escolhidos não limitam a resistência do concreto.

As etapas executadas no desenvolvimento experimental, conforme as recomendações do método, foram:

- a) a divisão do intervalo 60-120 MPa em 5 níveis, 65, 75, 90, 105 e 120 MPa, identificados pelas letras A até E. Considerou-se estes valores para a idade de 28 dias. Neste estudo, durante o seu desenvolvimento extrapolou-se o método, criando um sexto nível, identificado como A1 com resistência abaixo da inicial prevista para 50 MPa
- b) a estimativa dos máximos consumos de água entre 120 e 160 l/m<sup>3</sup>, são valores baseados pela experiência com concretos de alto abatimento que usam superplastificantes e agregados com diâmetro máximo característico de 12 a 19 mm. Para este estudo, devido a já citada criação do sexto nível com menor resistência à compressão e maior consumo de água, foram adotados para as dosagens, seis consumos de água variando entre 120 e 190 l/m<sup>3</sup> conforme mostrado na Tabela 5.5.
- c) a determinação da fração do volume dos componentes da pasta de cimento, parte de que o volume total da pasta é 0,35 m<sup>3</sup>. Inicialmente, subtraiu-se a água da pasta (determinada na Tabela 5.5) e o 0,02 m<sup>3</sup> de ar incorporado (2% do volume de concreto). A seguir, determinou-se as quantidades de aglomerante, cimento mais sílica ativa, (conhecendo as massas específicas de ambos) , e sabendo-se que a quantidade de sílica ativa corresponderia a 8% do peso total de aglomerante. Os volumes calculados do material cimentício, para cada resistência, estão mostrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.5. Resistências à compressão média e consumos máximos de água utilizados.

<b>Resistência</b>	<b>Resistência Média prevista (MPa)</b>	<b>Consumo máximo de água (kg/m<sup>3</sup>)</b>
A1	50	190
A	65	175
B	75	160
C	90	145
D	105	135
E	120	120

Tabela 5.6. Volumes para 0,35 m<sup>3</sup> de pasta, (MEHTA & AİTCIN, 1990b).

<b>Resistência</b>	<b>Água (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ar (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Total de material cimentício (m<sup>3</sup>)</b>	<b>CP + SA (m<sup>3</sup>)</b>
A1	0,190	0,02	0,1400	0,1248 + 0,0152
A	0,175	0,02	0,1550	0,1381 + 0,0169
B	0,160	0,02	0,1700	0,1515 + 0,0185
C	0,145	0,02	0,1850	0,1649 + 0,0201
D	0,135	0,02	0,1950	0,1738 + 0,0212
E	0,120	0,02	0,2100	0,1871 + 0,0229
CP- cimento Portland e SA – sílica ativa				

- d) a estimativa dos agregados, baseia-se em que o volume total dos agregados é 0,65 m<sup>3</sup> por metro cúbico de concreto. O método coloca que a relação miúdos/graúdos varia conforme a resistência, definida pela Tabela 5.7. Esta variação é devido ao decréscimo no consumo de água e o aumento de consumo do superplastificante.
- e) definição dos consumos em massas dos materiais, dividindo os valores de cada um, (obtidos em “c” e “d”), por suas massas específicas, (valores obtidos com os grãos saturados e superfície seca para a areia e brita), apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.7. Relação entre os agregados miúdos e graúdos conforme a resistência, (MEHTA & AİTCIN, 1990b).

<b>Nível de resistência</b>	<b>Relação volumétrica dos agregados miúdos : graúdos</b>
A1	2,05 : 2,95
A	2,00 : 3,00
B	1,95 : 3,05
C	1,90 : 3,10
D	1,85 : 3,15
E	1,80 : 3,20

Tabela 5.8. Consumos dos materiais para os lotes preliminares, considerando os agregados no estado saturado com superfície seca. (MEHTA & AİTCIN, 1990b).

<b>Nível</b>	<b>CP (Kg)</b>	<b>SA (Kg)</b>	<b>Total Água (Kg)</b>	<b>Agreg. Graúdo (Kg)</b>	<b>Agreg. Miúdo (Kg)</b>	<b>Peso Total (Kg)</b>	<b>Rel. A/A</b>
A1	392	34	190	1024	706	2346	0,45
A	434	38	175	1041	689	2376	0,37
B	476	41	160	1059	672	2407	0,31
C	518	45	145	1076	655	2438	0,26
D	546	47	135	1093	637	2458	0,23
E	587	51	120	1111	620	2489	0,19

- f) a dosagem preliminar de superplastificante, experimentada conforme recomenda o método, é de 1% de sólidos sobre a massa de cimento. Da mesma forma, para cada dosagem o peso da fração de água contida no aditivo foi subtraído dos consumos máximos de água definidos em “b”.
- g) a correção da umidade dos agregados miúdos e graúdos é necessária. É realizada subtraindo-se o volume de água contida nestes dos consumos máximos de água definidos em “b” para cada uma das dosagens.
- h) ajustes sobre os concretos experimentais definidos, necessários devido ao grande número de estimativas feitos pelo método. Se o abatimento estabelecido de no mínimo  $(150 \pm 20)$  mm, não foi alcançado aumenta-se gradualmente o consumo do aditivo superplastificante, até o limite em que se perde a coesão do concreto.

Se o concreto apresentar alguma segregação, deve-se aumentar a relação entre os agregados miúdos e graúdos para usar mais material fino.

As doze dosagens (seis iniciais mais seis repetições) desenvolvidas por este método, estão apresentadas no item 5.4.1. As quantidades dos materiais, por metro cúbico, mostradas na Tabela 5.11, são antes de se efetivar as correções devido as umidades.

### **5.2.1.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO AİTCIN**

O método desenvolvido e apresentado em AİTCIN (2000), segue as mesmas diretrizes básicas do ACI 211 (2001), próprio para concretos convencionais, baseando-se na combinação de resultados empíricos a partir da experiência e do critério do volume absoluto. Funciona, também, para concretos com ar incorporado, pela consideração da redução da resistência mecânica causada pelas bolhas de ar, sendo utilizado para faixas de resistência à compressão entre 40 e 160 MPa.

Para a aplicação deste método são necessárias as seguintes informações preliminares:

- a) definição da trabalhabilidade que se quer atingir, estabelecendo-se  $(150 \pm 20)$  mm, como nos demais métodos;
- b) definição do DMC. Estabeleceu-se para esta pesquisa a pretensão de se usar brita nº1, com DMC previsto para 19 mm. O material doado pelo fornecedor para a nossa pesquisa como brita nº1, apresentou pelos ensaios preparatórios um DMC de 25 mm.
- c) para a aplicação deste método, utilizou-se valores fornecidos pelos fabricantes e resultados de alguns ensaios preparatórios:
  - massa específica SSS ( $ME_{SSS}$ ) da areia (ensaios preparatórios);
  - massa específica SSS ( $ME_{SSS}$ ) da brita (ensaios preparatórios);
  - massa específica (ME) do cimento (fabricante);

- teor de absorção do agregado miúdo (ensaios preparatórios);
- teor de absorção do agregado graúdo (ensaios preparatórios);
- massa específica (ME) do superplastificante (fabricante);
- massa específica (ME) da sílica ativa (fabricante);
- Teor de sólidos do superplastificante (fabricante);
- Ponto de saturação do aditivo na pasta (ensaios preparatórios).

A seguir estão descritas as etapas para as dosagens:

a) a estimativa inicial da relação água/aglomerante (A/A), obtida a partir de um gráfico que relaciona a A/A com a resistência desejada, ver a Figura 5.3.

Como a finalidade deste trabalho é a comparação entre os métodos de dosagem definiu-se produzir cinco concretos, com as relações água/aglomerante (A/A) 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 e 0,40; e posteriormente, devido as resistências obtidas extrapolou-se o método até o A/A de 0,45 identificando estas dosagens como AIT-020, AIT-025, AIT-030, AIT-035, AIT-040, e AIT-045, respectivamente.

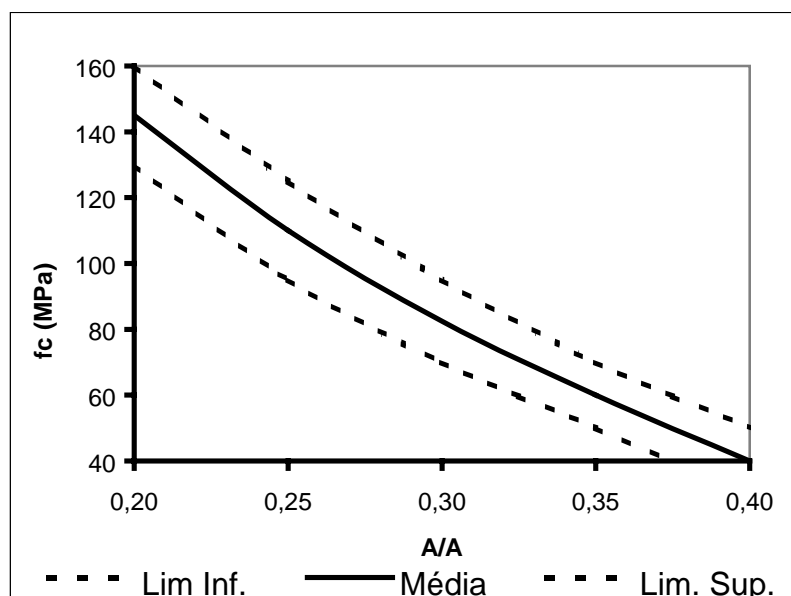


Figura 5.3. Relações propostas entre a relação água/aglomerante e a resistência à compressão, (AITCIN, 2000).

b) o método define o teor de água pelo ábaco da Figura 5.4, que relaciona esse teor com o ponto de saturação do aditivo superplastificante. Como o ponto de saturação do aditivo obtido pelo ensaio de fluência da pasta é de 1,2%, com o teor de sólidos de 30% definiu-se o ponto de saturação de sólidos que ficou em 0,4%. Este valor está abaixo da faixa de valores prevista no ábaco, e, extrapolando-o mesmo chegou-se a uma dosagem de água, aproximada, de 100 l/m<sup>3</sup>. Foram produzidos, experimentalmente, concretos com esta quantidade de água e, também, com 120 l/m<sup>3</sup>, mas não foi alcançado o abatimento desejado. Definiu-se então, baseados em MENDES (2002), o valor de 135 l/m<sup>3</sup> para este método.

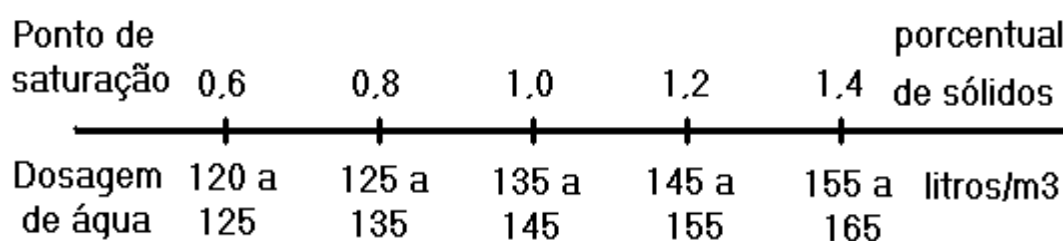


Figura 5.4. Ábaco para a determinação da dosagem de água, (AİTCIN, 2000).

c) a determinação da dosagem inicial do superplastificante foi deduzida a partir do ponto de saturação definido pelo ensaio de fluência da pasta, 1,2%.

d) a determinação da quantidade de agregados graúdos é estimada em função da forma dos grãos. O formato das partículas da brita utilizada foi definido em MENDES (2002) como média. Com o uso do ábaco da Figura 5.5, foi definida a quantidade de 1.050 kg de agregado graúdo por metro cúbico de concreto.

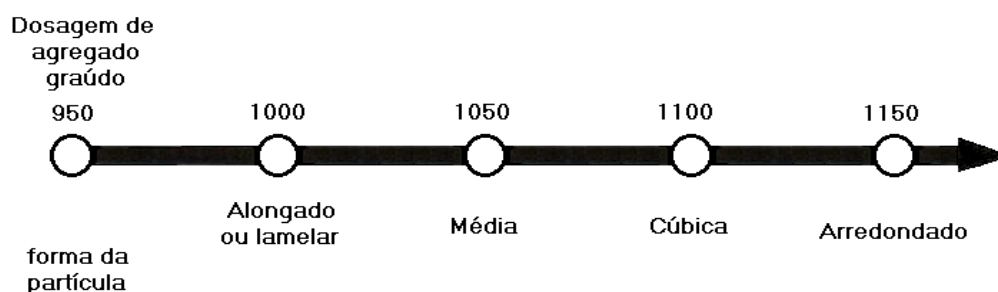


Figura 5.5. Ábaco para a determinação do teor de agregado graúdo, (AİTCIN, 2000).

e) o teor de ar incorporado, deve variar de 1 a 3%. Antes de se poder usar valores reais obtidos por ensaios sobre o concreto estudado, o autor sugere iniciar com 1,5% que foi o valor utilizado.

f) a seguir, foi aplicada a planilha definida pelo método, que, contendo as características dos materiais, inclusive o teor de umidade dos agregados grão e miúdo, procede aos cálculos para a definição das quantidades dos materiais para a produção de cada betonada com 74 kg de concreto. Este peso foi definido para se gerar o volume necessário de concreto para o preenchimento de 12 CPs, mais o ensaio de densidade. Na Tabela 5.9, está mostrado, como exemplo, a planilha para a primeira betonada da dosagem AIT-040.

Tabela 5.9. Planilha do método *Aïtcin* para os cálculos das quantidades.

AIT-040	1	2	3	4	5	6
Materiais	Consumo (kg/m³)	Volume (l/m³)	Dosagem cond. SSS (kg/m³)	Correção de água (l/m³)	Composição 1m³	Betonada
Água	<sup>2</sup> 135	<sup>2</sup> 135	<sup>2</sup> 135		<sup>23</sup> 111	<sup>25,0</sup> 3,36
<sup>1</sup> a/c = 0.4						
Cimento	<sup>3</sup> 338	<sup>4.1</sup> 99	<sup>4.1</sup> 311		<sup>4.1</sup> 311	<sup>26.1</sup> 9,42
Sílica Ativa	<sup>4.2</sup> 27	<sup>8.2</sup> 12	<sup>4.2</sup> 27		<sup>4.2</sup> 27	<sup>26.2</sup> 0,82
Brita	<sup>5</sup> 1050	<sup>9</sup> 393	<sup>5</sup> 1050	<sup>18</sup> -13	<sup>17</sup> 1063	<sup>27,0</sup> 32,20
Areia		<sup>13</sup> 344	<sup>14</sup> 907	<sup>20</sup> -4	<sup>19</sup> 909	<sup>28,0</sup> 27,60
Ar Incorporado	<sup>6</sup> 1,5 %	<sup>10</sup> 15	0			
Superplastific.	<sup>7</sup> 0,9 %	<sup>11</sup> Vsol 1,20	<sup>15</sup> Msol 3,0	<sup>21</sup> -7	<sup>24</sup> Vliq 9,2	<sup>29</sup> Vliq 0,28
Total		<sup>12</sup> 656	<sup>16</sup> 2433	<sup>22</sup> -24		<sup>30,0</sup> 74,0



### 5.2.1.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO IPT/EPUSP MODIFICADO

Este método, baseado nas citações de CREMONINI *et al.* (2001), objetivou alcançar resistências mecânicas elevadas, com o mínimo consumo de cimento possível, adaptando-se para CAR o método IPT/EPUSP (HELENE & TERZIAN, 1992). No método são propostas algumas considerações iniciais que foram aplicadas neste programa experimental, como seguem:

- a fixação de uma baixa relação água/materiais secos, (H);
- a utilização de 8,0% de sílica ativa para substituição de parte do volume de material cimentante;
- determinação do teor de argamassa ( $\alpha$ ).

Procedimentos realizados para as dosagens:

- a) a fixação de uma baixa relação água/materiais secos, (H).

É uma característica fundamental para se obter alta resistência. Em concretos convencionais estes valores são superiores a 8,5%. Os criadores do método indicam que os valores mais comuns para CAR estão na faixa de 6 a 5%. Definiu-se, para este estudo, 6%.

- b) Cálculo da reação água/aglomerante.

Uma vez fixado o valor de H%, calculou-se a relação água/aglomerante seguindo a “Lei de Lyse”, pelas Equações 5.01 e 5.02.

$$H\% = \frac{\text{água / aglomerante}}{(1 + m)} \quad (5.01)$$

$$\text{ou } \text{água / aglomerante} = H\% \times (1 + m) \quad (5.02)$$

O “m” é massa total de agregados secos em relação à massa de aglomerante.

Para um traço 1:m , “a” e “p” representam os agregados miúdos e graúdos secos respectivamente, conforme a Equação 5.03.

$$m = a + p \quad (5.03)$$

c) Determinação do teor de argamassa ( $\alpha$ ).

Usando se “m” igual a 5 (traço 1:5) e fixando para o abatimento ( $150 \pm 20$ ) mm, pelos incrementos no teor de argamassa ( $\alpha$ ) definidos na Equação 5.04, de acordo com a metodologia colocada em HELENE & TERZIAN (1992) para o método IPT/EPUSP, por observações a respeito do preenchimento dos vazios entre os grãos do agregado graúdo, assim como, da homogeneidade e coesão da massa, chegou-se ao teor de argamassa adequado com os agregados selecionados.

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + a + p} \quad (5.04)$$

Com o valor do teor de argamassa de 41% em um traço 1:5, utilizando as Equações 5.03 e 5.04, definiu-se o traço inicial para a procura do teor ideal de argamassa “ $\alpha$ ”. Após imprimação prévia da betoneira colocou-se 8,47 kg de cimento, 12,37 kg de areia, 30,00 kg de brita e 4,0 litros de água dentro da betoneira. Sobre este concreto inicial foram feitos incrementos de argamassa alcançando  $\alpha$  de 51%, com 10,20 kg de cimento Portland, 21,02 kg de areia, 30,00 kg de brita e 5,1 litros de água na betoneira, quando foi atingido o teor ideal de argamassa com abatimento de 60 mm.

d) Desenvolvimento dos traços.

Uma vez definido o teor de argamassa “ $\alpha$ ” em 51%, com cinco diferentes valores para “m” igualmente distanciados, calculou-se os três traços (1:a:p), chegando aos valores de “a” e “p” com o uso das Equações 5.03 e 5.04. Os valores de m escolhidos, assim como os respectivos “a” e “p” calculados estão apresentados na Tabela 5.10. A definição da amplitude dos valores para “m” foi o objetivo de se trabalhar com as mesmas as relações A/A de 0,20 a 0,40 utilizadas, inicialmente, no método *Aïtcin*, com abatimento desejado de ( $150 \pm 20$ ) mm. Assim, a faixa das relações A/A do estudo foi, praticamente, a mesma para os três métodos, permitindo uma melhor comparação destes.

Tabela 5.10. Valores definidos para “m”, “a” e “p”.

<b>m</b>	<b>a</b>	<b>P</b>
2,34	0,700	1,640
3,17	1,129	2,038
4,00	1,550	2,450
4,83	1,970	2,860
5,66	2,397	3,266

e) Determinação das massas de cimento e sílica ativa.

O método original calcula a substituição de parte do cimento pela sílica ativa definindo-se o percentual por volumes. Neste programa experimental, para acompanhar os outros métodos e produzir concretos com o mesmo % de sílica ativa, fez-se a substituição por peso, já definida em 8% de sílica ativa sobre o total de aglomerante. Para atender a este percentual, a relação para as quantidades por peso de cimento e de sílica ativa foram sempre, respectivamente, de 0,926 e 0,074 .

f) Dosagem dos aditivos plastificante e superplastificante:

As quantidades do aditivo superplastificante colocadas nos concretos dosados foram as necessárias para que se obtivesse o abatimento desejado de  $(150 \pm 20)$  mm, sempre cuidando que a massa não perdesse a homogeneidade.

### 5.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS DE DOSAGEM

Com o objetivo de se comparar os métodos de dosagem analisados, e para obter os parâmetros que caracterizavam os CAR, desenvolvidos por cada um destes, seguindo a metodologia específica para cada método, calculou-se as quantidades para cada material.

Procedeu-se à confecção dos concretos e com eles foram realizados ensaios de resistência à compressão  $f_c$  (NBR 5739, 1994) executados sobre corpos-de-prova (CPs) cilíndricos (10 x 20) cm.

O planejamento inicial previa a confecção de cinco dosagens, (com uma repetição para cada), para cada método, com valores de relações A/A (água/aglomerante) variando entre as relações água/aglomerante de 0,20 a 0,40, conforme indicam os resultados de MENDES (2002).

Para o método *Aïtcin* foram utilizadas as relações 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 e 0,40; para o método *Mehta/Aïtcin*, como não se inicia fixando valores para a relação A/A, as dosagens iniciais foram então feitas com as relações 0,19; 0,23; 0,26; 0,31 e 0,37. Para o método *IPT/EPUSP modificado*, também, aplicou-se 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 e 0,40. Após a obtenção dos resultados das rupturas de todos os CPs até então moldados, observou-se que os valores de ruptura para os métodos *Aïtcin* e *Mehta/Aïtcin*, os concretos com relações A/A mais altas (0,40 e 0,37 respectivamente) haviam gerado resultados de resistências à compressão muito superiores ao limite mínimo dos CAR de 50 MPa. Desta forma, para melhorar a abrangência do estudo, confeccionou-se mais uma dosagem (com a devida repetição) para cada um destes dois métodos, utilizando a relação A/A 0,45 para ambos. Não foram feitas dosagens extras (relações A/A de 0,45) para o método do *IPT/EPUSP modificado* devido aos resultados aos 3 dias estarem gerando valores de resistências à compressão baixas comparativamente aos demais, neste período foram feitas as dosagens extras com relações A/A de 0,45 para os outros métodos.

A seguir estão apresentadas as seqüências dos procedimentos usados para as dosagens dos concretos em cada um dos três métodos sendo utilizada a premissa:

- a) para todos os traços produzidos foi descontada a água presente nos agregados miúdos e grãos, cujos teores de umidade foram previamente medidos;
- b) antes da colocação dos materiais a betoneira foi imprimada para evitar a perda por absorção destes pela superfície interna da betoneira;

- c) a ordem de colocação dos materiais dentro da betoneira teve sempre a mesma sequência: brita, areia, cimento, sílica ativa, a água e o aditivo superplastificante. Posteriormente foram adicionadas pequenas quantidades do aditivo até atingir o abatimento desejado;
- d) foi adotado, como objetivo, um abatimento de  $(150 \pm 20)$  mm, considerando-se assim estes concretos aptos para bombeamento;
- e) para cada concreto dosado foram moldados doze corpos-de-prova (CPs) (10 x 20) cm, com a finalidade de ensaiá-los à compressão, seguindo o planejamento: 3 CPs aos 3 dias; 3 CPs aos 7 dias e 3 CPs aos 28 dias. Foram moldados CPs de sobra para servirem como eventuais substitutos, em caso de problemas com a moldagem ou a retificação dos topos, principalmente em razão das dificuldades ocorridas com esta última operação, que serão comentadas na sequência deste trabalho;
- f) para cada dosagem foi sempre feita uma dosagem de repetição em dia diferente, para minimizar a possibilidade da ocorrência de erros sistemáticos.

Os concretos foram confeccionados com o uso de uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros, mostrada na Figura 5.6. O período de mistura foi mantido em dez minutos antes da primeira verificação de abatimento.

Para os teores de ar incorporado foram usados os valores previstos nos cálculos de dosagem de cada método.

Os ensaios de abatimento foram feitos segundo a NBR-NM-67 (1998); a verificação das massas específicas segundo a norma NBR-9833 (1987) e o adensamento dos CPs (10 x 20) cm feito com vibrador de imersão de agulha de  $\frac{3}{4}$ ", conforme a NBR 12654 (1992). Logo após a moldagem, com a finalidade de evitar a perda de água, os CPs foram protegidos por uma película plástica, como mostra a Figura 5.7, sendo o procedimento de desmoldagem executado 24 horas após a moldagem, ficando então os CPs em câmara úmida até a data da ruptura, quando foi feita a retificação e o capeamento dos CPs.



Figura 5.6. Betoneira utilizada nas dosagens.

O tempo mínimo de mistura de dez minutos foi determinado em função da maior tixotropicidade dos CAR, comparando-se aos concretos convencionais. Esse detalhe foi de vital importância para a obtenção de concretos homogêneos produzidos com relações A/A mais baixas.

A opção de se adotar três CPs para os ensaios foi feita para dar validade às conclusões experimentais, sendo que ainda estabeleceu-se realizar uma repetição para cada uma das dosagens confeccionadas, proporcionando assim uma maior confiabilidade aos resultados obtidos.



Figura 5.7. CPs recém moldados protegidos por uma película plástica.

É importante se salientar que os concretos com relações água/aglomerante mais baixas, embora com o abatimento adequado, apresentavam uma significativa dificuldade para serem moldados dentro dos CPs, devido a elevada coesão apresentada.

### 5.3.1 DOSAGENS DOS CONCRETOS

A seguir, estão apresentadas as dosagens utilizadas que foram calculadas de acordo com a metodologia específica cada método, já descritas no item 5.3.1, sendo utilizada a nomenclatura R1 para a primeira dosagem de cada método e R2 a sua repetição.

Pelo método *Mehta/Aïtcin* confeccionou-se doze concretos, com seis relações A/A diferentes: 0,45; 0,37; 0,31; 0,26; 0,23 e 0,19; e suas repetições, que foram identificados, respectivamente, como: MEH-045, MEH-037, MEH-031, MEH-026, MEH-023, e MEH-019. Pelo método *Aïtcin*, da mesma forma confeccionou-se doze concretos, também, com seis relações A/A: 0,45; 0,40; 0,35; 0,30; 0,25 e 0,20; identificados, respectivamente, como: AIT-045, AIT-040, AIT-035, AIT-030, AIT-025, e AIT-020. Pelo método *IPT/EPUSP modificado*, foram confeccionados dez concretos com relações A/A diferentes: 0,40; 0,35; 0,30; 0,25 e 0,20; identificados por: IPT-040, IPT-035, IPT-030, IPT-025 e IPT-020.

Nas Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 estão apresentados as quantidades dos materiais, por metro cúbico de concreto, definidas para as dosagens, antes da correção da umidade, para cada um dos concretos citados.

Tabela 5.11. Consumos dos materiais – Método *Mehta/Aïtcin*.

Dosagem		Relação a/aglom	Cimento (kg)	S. A. (kg)	Água (l)	Brita (kg)	Areia (kg)	Adit. SP (kg)	Abat. (mm)
MEH-019	R1	0,19	587	51	120	1111	620	25,5	160
MEH-023	R1	0,23	546	47	135	1093	637	13,7	170
MEH-026	R1	0,26	518	45	145	1076	655	7,6	170
MEH-031	R1	0,31	476	41	160	1059	672	3,7	150
MEH-037	R1	0,37	434	38	175	1041	689	3,3	170
MEH-045	R1	0,45	392	34	190	1024	706	2,9	170
MEH-019	R2	0,19	587	51	120	1111	620	27,8	170
MEH-023	R2	0,23	546	47	135	1093	637	13,7	170
MEH-026	R2	0,26	518	45	145	1076	655	6,6	170
MEH-031	R2	0,31	476	41	160	1059	672	4,9	170
MEH-037	R2	0,37	434	38	175	1041	689	3,3	160
MEH-045	R2	0,45	392	34	190	1024	706	2,2	160
S.A. – sílica ativa									

Tabela 5.12. Consumos dos materiais – Método *Aïtcin*.

Dosagem		Relação a/aglom	Cimento (kg)	S. A. (kg)	Água (l)	Brita (kg)	Areia (kg)	Adit. SP (kg)	Abat. (mm)
AIT-020	R1	0,20	621	54	135	1050	602	29,3	170
AIT-025	R1	0,25	497	43	135	1050	723	18,0	170
AIT-030	R1	0,30	414	36	135	1050	807	15,0	150
AIT-035	R1	0,35	355	31	135	1050	863	11,6	150
AIT-040	R1	0,40	311	27	135	1050	907	10,1	150
AIT-045	R1	0,45	276	24	135	1050	939	8,0	170
AIT-020	R2	0,20	621	54	135	1050	602	29,3	170
AIT-025	R2	0,25	497	43	135	1050	723	18,0	170
AIT-030	R2	0,30	414	36	135	1050	807	10,5	170
AIT-035	R2	0,35	355	31	135	1050	863	9,0	160
AIT-040	R2	0,40	311	27	135	1050	907	7,9	150
AIT-045	R2	0,45	276	24	135	1050	939	8,0	170
S.A. – sílica ativa									

Tabela 5.13. Consumos dos materiais – Método *IPT/EPUSP modificado*.

Dosagem		Relação a/aglom	Cimento (kg)	S. A. (kg)	Água (l)	Brita (kg)	Areia (kg)	Adit.SP (kg)	Abat. (mm)
IPT-020	R1	0,20	698	61	152	1244	531	43,0	150
IPT-025	R1	0,25	555	48	151	1230	681	34,2	180
IPT-030	R1	0,30	460	40	150	1225	775	28,3	180
IPT-035	R1	0,35	393	34	149	1222	841	22,8	170
IPT-040	R1	0,40	343	30	149	1218	894	18,6	160
IPT-020	R2	0,20	698	61	152	1244	531	39,4	190
IPT-025	R2	0,25	555	48	151	1230	681	34,2	160
IPT-030	R2	0,30	460	40	150	1225	775	28,3	180
IPT-035	R2	0,35	393	34	149	1222	841	22,8	160
IPT-040	R2	0,40	343	30	149	1218	894	16,0	170
S.A. – sílica ativa									



### 5.3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

Para a ruptura de CPs confeccionados com CAR é necessário o uso de técnicas que regularizassem os seus topos, como recomendado em AÏTCIN (2000). O programa experimental desta dissertação ficou limitado em utilizar os equipamentos disponíveis do LAME/LACTEC, pois o torno de desbaste retificador utilizado em MENDES (2002), não está mais disponível, o que dificultou a comparação desses resultados com os obtidos em MENDES (2002).

Foram realizados testes preliminares com um equipamento retificador de CPs, que, infelizmente, não gerou resultados satisfatórios por não deixar a superfície dos CPs perfeitamente planas. Experimentou-se também, a técnica de colocar nos topos dos CPs, anéis metálicos preenchidos com discos de neoprene. Este processo quando testado em CPs de concretos acima de 80 MPa, fez com que os discos de neoprene fluíssem pelas pequenas frestas existentes entre os CPs e os anéis metálicos, tornando o ensaio inútil.

A alternativa encontrada, que nos testes preliminares com CAR deu bons resultados, foi a retificação dos topos dos CPs com uma máquina de corte, Figura 5.8, com o posterior capeamento desses com uma camada fina, aproximadamente, 2 mm, de argamassa de enxofre. Na Figura 5.9 é visível a aparência do topo de um CP, após o corte com a máquina, a existência de pequenas irregularidades que ainda justificam a necessidade do complemento com a fina camada de enxofre, conforme a Figura 5.10.



Figura 5.8. Máquina cortando um CP da pesquisa.

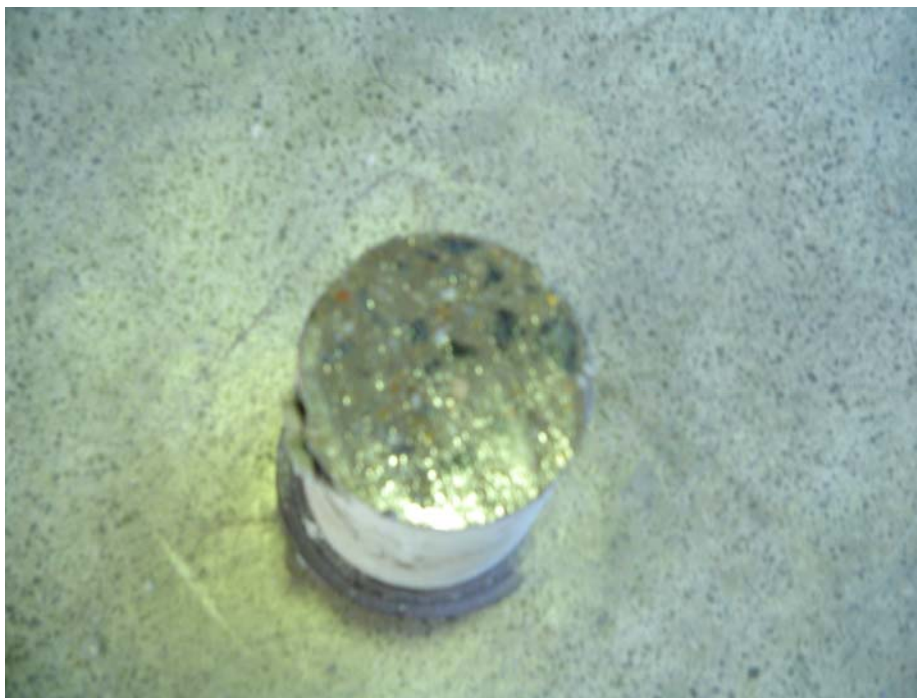


Figura 5.9. Aspecto do topo de um CP após o corte na máquina.



Figura 5.10. CPs em procedimento de capeamento com enxofre.

### 5.3.3 ENSAIOS DE RUPTURA

Para a execução das rupturas dos CPs foi utilizada prensa, marca EMIC, com capacidade para 200 toneladas servo-controlada, com controle e aquisições digitais mostrada na Figura 5.11. O prato inferior da prensa é fixo e o superior tem cabeça esférica, para acertar diferenças de paralelismo entre as faces dos CPs. Antes do início de cada ensaio foi verificada a centralização do CP no prato inferior.

A seguir, no item 6 estão apresentados os resultados dos ensaios de ruptura à compressão obtidos sobre os CPs confeccionados com os concretos dosados por cada um dos três métodos. Nas tabelas são mostradas as tensões de rupturas aos 3, 7 e 28 dias obtidas para cada método, dosagem e sua repetição. Junto a cada conjunto de resultados para a mesma relação A/A e idade, já estão apresentadas a média, o desvio padrão (Dpad) e o coeficiente de variação percentual (CV %).



Figura 5.11. Prensa EMIC utilizada para as rupturas.

## 6. RESULTADOS DA PESQUISA

Neste item estão apresentados os resultados decorrentes da aplicação da metodologia da pesquisa, iniciando-se pelos resultados dos ensaios preparatórios, executados sobre os agregados e a compatibilidade aglomerante-aditivo, seguidos dos resultados das rupturas à compressão dos CPs moldados com concretos produzidos pelos diferentes métodos.

### 6.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS PREPARATÓRIOS

Para possibilitar o desenvolvimento dos métodos de dosagem são necessários alguns ensaios preparatórios aplicados principalmente sobre os agregados, com a finalidade de se obter algumas características destes. Além dos agregados, também sobre o conjunto do aglomerante, (cimento e sílica ativa), com o aditivo superplastificante são necessários ensaios de compatibilidade.

#### 6.1.1 ENSAIOS SOBRE OS AGREGADOS

A areia natural utilizada nesta pesquisa sofreu alguns ensaios previstos pelas normas brasileiras, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2. A curva granulométrica pela NBR 7211, 1983 é apresentada na Figura 6.1.

Tabela 6.1. Distribuição granulométrica do agregado miúdo, fonte LAME/LACTEC.

Abertura da peneira em (mm)	% média retida	% média acumulada
4,80	3 %	3 %
2,40	10 %	12 %
1,20	18 %	30 %
0,60	20 %	50 %
0,30	22 %	72 %
0,15	20 %	92 %
< 0,15	8 %	100 %

Tabela 6.2. Resultados dos agregados miúdos, fonte LAME/LACTEC.

Ensaio realizado	Resultados	Método de ensaio	Limites NBR 7211/83
DMC (mm)	4,80	NM 248/2003	-
Módulo de finura	2,60	NM 248/2003	-
Massa Específica SSS ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,63	NBR 9776/87	-
Massa Específica Seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,62	NBR 9776/87	-
Massa Unitária Solta ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,49	NBR 7251/82	-
Absorção (%)	0,60	NBR 9777/87	-
Material Pulverulento (%)	4,4	NBR 7219/87	< 3,0 % *
Torrões de argila (%)	0,1	NBR 7218/87	1,0 a 3,0 %

\*Para concreto submetido a desgaste superficial, nos demais o limite é 5,0%.

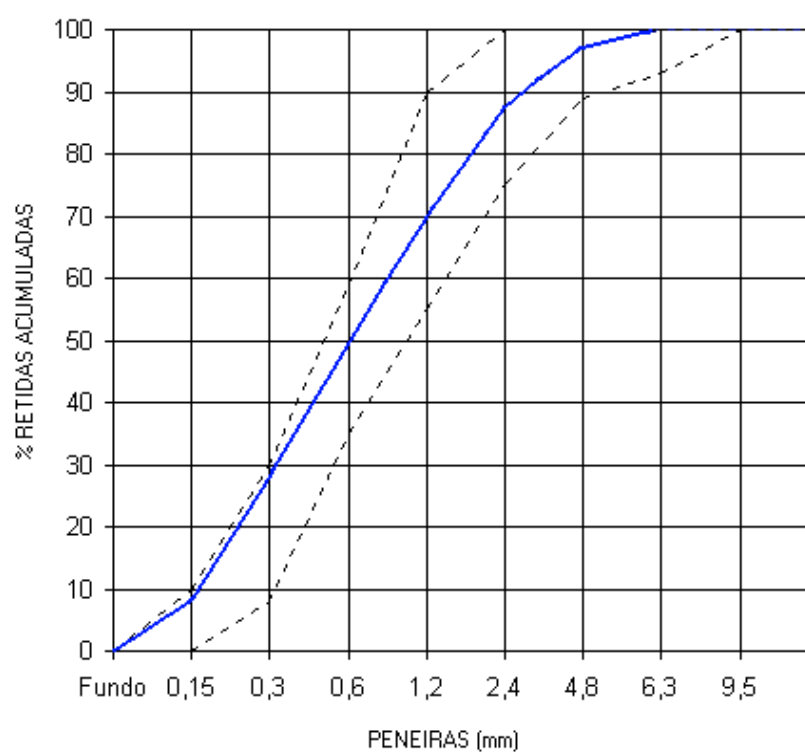


Figura 6.1. Curva granulométrica do agregado miúdo, fonte LAME/LACTEC.

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa, proveniente de granito britado, está com suas principais características, obtidas por ensaios, apresentadas na Tabela 6.3 e sua curva granulométrica na Figura 6.2.

Tabela 6.3. Características do agregado graúdo proveniente de granito britado, fonte LAME/LACTEC.

Ensaio realizado	Resultados	Método de ensaio	Limites NBR 7211/83
DMC	25,0	NM 248/2003	-
Módulo de finura	6,89	NM 248/2003	-
Absorção (%)	0,80	NBR 9937/87	-
Massa Específica SSS ( $\text{g/cm}^3$ )	2,67	NBR 9937/87	-
Massa Específica Seca ( $\text{g/cm}^3$ )	2,65	NBR 9937/87	-
Massa Unitária Solta ( $\text{g/cm}^3$ )	1,42	NBR 7251/82	-
Massa Unitária Compactada ( $\text{g/cm}^3$ )	1,54	NBR 7810/82	-
Material Pulverulento (%)	0,2	NBR 7219/87	$\leq 3,0 \%$
Abrasão Los Angeles (%)	17	NBR 6465/84	$\leq 50\%$
Índice de forma	2,41	NBR 7809/83	-

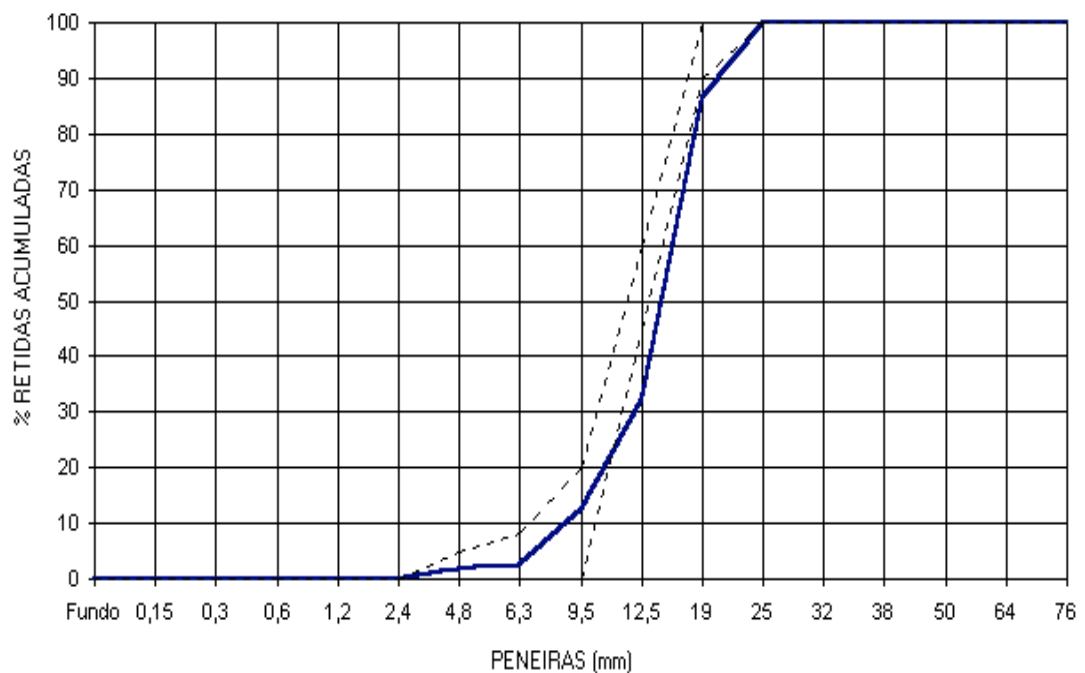


Figura 6.2. Curva granulométrica do agregado graúdo, fonte LAME/LACTEC.



### 6.1.2 VERIFICAÇÃO DA COMPATIBILIDADE CIMENTO-ADITIVO

Foi feita a execução do ensaio de fluidez da pasta, com o cone de Marsh, NBR 7682 (1983), para a verificação da fluência da pasta com diversos teores de aditivo, (0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,8 e 1,0%), sendo medidos os tempos de escoamento em segundos da pasta com cinco, trinta e sessenta minutos, conforme o apresentado na Figura 6.3. As quantidades de cimento, sílica ativa e água foram mantidas constantes em todas as pastas, variando-se somente a quantidade de aditivo. A água contida no aditivo foi descontada da água adicionada.



Figuras 6.3. Equipamento para o ensaio de fluidez.

Com as medições dos tempos de escoamento foi traçado o gráfico tempo de escoamento pelo teor de aditivo, sendo então determinada a dosagem ótima do aditivo ou “ponto de saturação”, fixado em 0,4% da pasta, como mostra o gráfico da Figura 6.4.

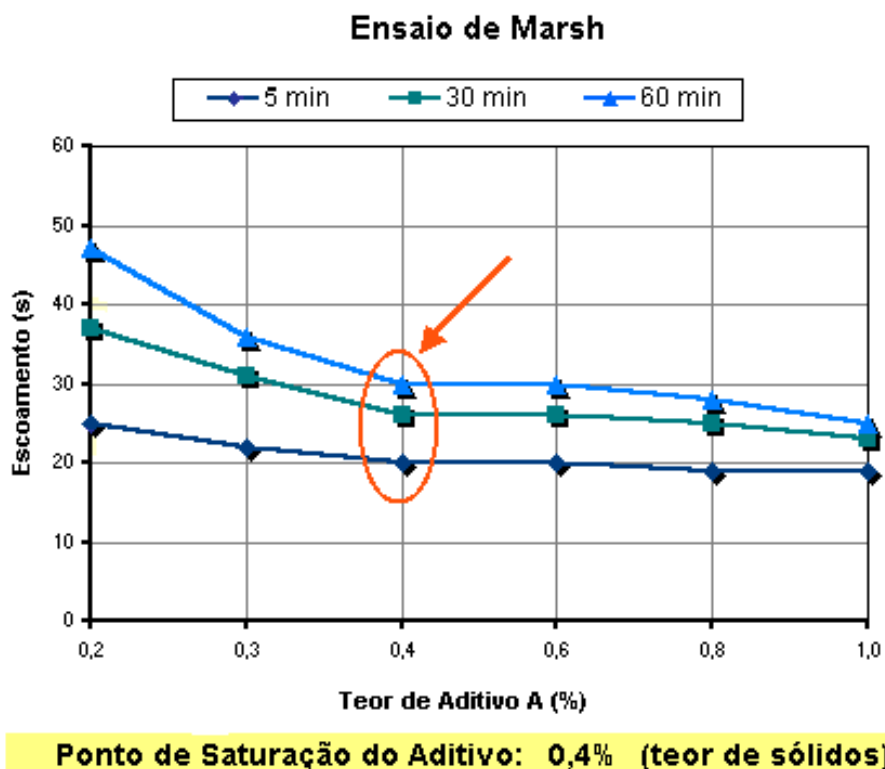


Figura 6.4. O ponto de saturação do aditivo utilizado na pesquisa, fonte LAME/LACTEC.

## 6.2 RESULTADOS OBTIDOS COM OS CONCRETOS PRODUZIDOS

A seguir estão os resultados obtidos a partir da ruptura dos CPs moldados com os concretos produzidos pela aplicação de cada método de dosagem utilizado na pesquisa.

### 6.2.1 RESULTADOS DO MÉTODO MEHTA-AITCIN

A seguir, estão apresentados na Tabela 6.4, os resultados obtidos pela ruptura dos CPs dosados pelo método *Mehta/Aïtcin*, para o qual foram confeccionados concretos com seis relações A/A diferentes identificados como: MEH-045, MEH-037, MEH-031, MEH-026, MEH-023, e MEH-019.

Na Figura 6.5 estão apresentadas as curvas que correlacionam as resistências médias ( $f_{cj}$ ), com as suas respectivas relações A/A aos 3, 7 e 28 dias. Na mesma figura estão mostradas as equações de ajuste com seus correspondentes  $R^2$ .



Tabela 6.4. Resultados à compressão – método *Mehta/Aïtcin*.

MEHTA – AÏTCIN	fcj 3 dias MPa		Média 3 dias MPa	fcj 7 dias MPa		Média 7 dias MPa	fcj 28 dias MPa		Média 28 dias MPa
	R1	R2		R1	R2		R1	R2	
<b>MEH-045</b>	41,3	34,8	<b>36,9</b>	48,7	41,8	<b>43,6</b>	63,1	54,2	<b>58,0</b>
	38,4	35,5		47,7	37,9		64,2	53,3	
	37,1	34,3		43,9	41,8		61,8	51,2	
	<i>DPad</i> =	2,2    0,6	2,6	2,5	2,3	4,0	1,2	1,5	5,7
	<i>CV</i> (%) =	5,5    1,7	7,1	5,4	5,6	9,3	1,9	2,9	9,8
<b>MEH-037</b>	53,1	49,4	<b>50,1</b>	58,1	48,3	<b>56,8</b>	84,3	75,7	<b>74,6</b>
	52,5	46,0		54,6	55,1		79,7	70,8	
	52,1	47,7		65,6	59,1		67,3	69,8	
	<i>DPad</i> =	0,5    1,7	2,9	5,6	5,5	5,7	8,8	3,2	6,5
	<i>CV</i> (%) =	1,0    3,6	5,8	9,5	10,1	10,1	11,4	4,4	8,7
<b>MEH-031</b>	60,5	54,6	<b>58,1</b>	75,6	62,8	<b>67,0</b>	97,7	82,9	<b>86,2</b>
	65,6	54,9		71,7	62,9		95,9	77,4	
	59,9	53,3		71,8	57,3		84,8	78,5	
	<i>DPad</i> =	3,1    0,9	4,7	2,2	3,2	7,0	7,0	2,9	8,7
	<i>CV</i> (%) =	5,1    1,6	8,1	3,0	5,3	10,5	7,5	3,7	10,1
<b>MEH-026</b>	76,1	62,8	<b>68,2</b>	90,7	71,5	<b>81,5</b>	104,4	90,5	<b>98,5</b>
	69,7	71,6		88,3	76,1		115,4	91,8	
	61,5	67,7		83,0	79,6		104,4	84,6	
	<i>DPad</i> =	7,3    4,4	5,5	3,9	4,1	7,3	6,4	3,8	11,5
	<i>CV</i> (%) =	10,6    6,5	8,0	4,5	5,4	8,9	5,9	4,3	11,6
<b>MEH-023</b>	80,9	70,5	<b>76,6</b>	97,4	79,2	<b>88,6</b>	117,2	82,3	<b>100,8</b>
	73,4	72,8		97,0	78,9		109,9	95,3	
	78,6	83,6		92,7	86,4		108,9	91,0	
	<i>DPad</i> =	3,8    7,0	5,2	2,6	4,2	8,4	4,5	6,6	13,3
	<i>CV</i> (%) =	4,9    9,2	6,7	2,7	5,2	9,5	4,0	7,4	13,2
<b>MEH-019</b>	83,3	83,2	<b>82,7</b>	96,7	96,2	<b>91,5</b>	114,0	106,8	<b>108,5</b>
	94,3	80,1		88,1	84,8		116,6	100,4	
	79,2	76,1		100,7	82,3		105,1	108,1	
	<i>DPad</i> =	7,8    3,6	6,3	6,4	7,4	7,4	6,0	4,1	5,9
	<i>CV</i> (%) =	9,1    4,5	7,6	6,8	8,4	8,1	5,4	3,9	5,5

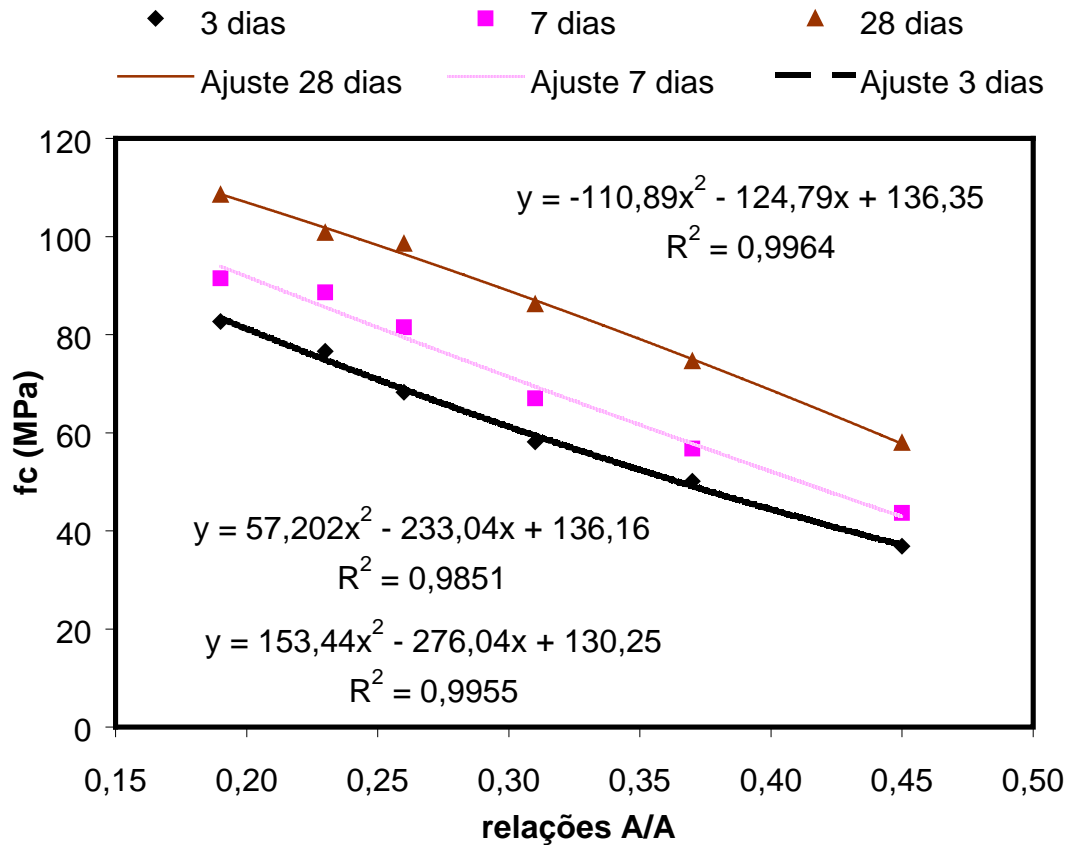


Figura 6.5. Correlações  $f_c$  x relação A/A para o método *Mehta/Aïtcin*.

## 6.2.2 RESULTADOS DO MÉTODO AITCIN

A seguir estão apresentados, na Tabela 6.5 os resultados obtidos pela ruptura dos CPs moldados com concretos dosados pelo método *Aïtcin*, que foram confeccionados com concretos de seis relações A/A diferentes identificados como: AIT-045, AIT-040, AIT-035, AIT-030, AIT-025, e AIT-020.

Na Figura 6.6 estão apresentadas as curvas que correlacionam as resistências médias ( $f_{cj}$ ), com as suas respectivas relações A/A aos 3, 7 e 28 dias. Na mesma figura estão mostradas as equações de ajuste com seus correspondentes  $R^2$ .

Tabela 6.5. Resultados à compressão – método Aitcin

AITCIN	fcj 3 dias MPa		Média 3 dias MPa	fcj 7 dias MPa		Média 7 dias MPa	fcj 28 dias MPa		Média 28 dias MPa
	R1	R2		R1	R2		R1	R2	
<b>AIT-045</b>	28,8	31,7	<b>31,0</b>	37,4	44,6	<b>39,2</b>	52,8	55,4	<b>54,7</b>
	30,3	33,3		36,9	41,1		53,3	59,7	
	29,7	32,1		37,8	37,3		51,6	55,3	
<i>Dpad</i> =	0,8	0,8	1,7	0,4	3,6	3,1	0,9	2,5	2,9
<i>CV (%)</i> =	2,6	2,5	5,4	1,2	8,9	7,8	1,6	4,4	5,2
<b>AIT-040</b>	46,7	44,9	<b>44,7</b>	65,5	53,0	<b>59,3</b>	74,6	75,7	<b>76,5</b>
	46,4	45,5		60,9	58,7		79,0	77,7	
	37,5	47,1		62,6	55,0		79,4	72,8	
<i>Dpad</i> =	5,2	1,1	3,6	2,3	2,9	4,7	2,6	2,5	2,6
<i>CV (%)</i> =	12,0	2,5	8,1	3,7	5,2	7,9	3,4	3,3	3,4
<b>AIT-035</b>	47,5	58,9	<b>51,2</b>	68,7	67,1	<b>68,3</b>	83,7	82,4	<b>80,8</b>
	47,4	51,6		74,5	67,0		78,3	80,1	
	47,1	54,6		67,9	64,6		81,6	79,0	
<i>Dpad</i> =	0,2	3,6	4,8	3,6	1,4	3,3	2,7	1,7	2,1
<i>CV (%)</i> =	0,5	6,6	9,4	5,1	2,2	4,9	3,3	2,1	2,6
<b>AIT-030</b>	54,6	41,9	<b>52,5</b>	75,3	71,0	<b>74,7</b>	91,0	96,7	<b>92,0</b>
	51,2	56,2		77,2	74,8		91,3	92,1	
	55,4	55,5		77,6	72,2		88,9	92,3	
<i>Dpad</i> =	2,2	8,0	5,5	1,2	2,0	2,7	1,3	2,6	2,6
<i>CV (%)</i> =	4,1	15,7	10,4	1,6	2,7	3,6	1,5	2,8	2,8
<b>AIT-025</b>	65,2	74,8	<b>69,4</b>	72,8	80,2	<b>82,8</b>	100,6	105,0	<b>101,5</b>
	62,6	77,6		88,2	80,8		99,7	109,6	
	64,7	71,2		88,1	86,8		92,5	101,5	
<i>Dpad</i> =	1,4	3,2	6,1	8,9	3,6	6,1	4,4	4,1	5,7
<i>CV (%)</i> =	2,2	4,3	8,8	10,7	4,4	7,3	4,5	3,9	5,6
<b>AIT-020</b>	83,7	76,8	<b>75,8</b>	95,1	82,2	<b>89,9</b>	100,3	111,9	<b>108,3</b>
	57,7	85,8		96,6	89,0		107,0	112,6	
	73,2	77,7		82,7	93,6		108,0	109,8	
<i>Dpad</i> =	13,1	5,0	10,0	7,6	5,8	6,3	4,2	1,5	4,5
<i>CV (%)</i> =	18,3	6,2	13,2	8,4	6,5	7,0	4,0	1,3	4,1

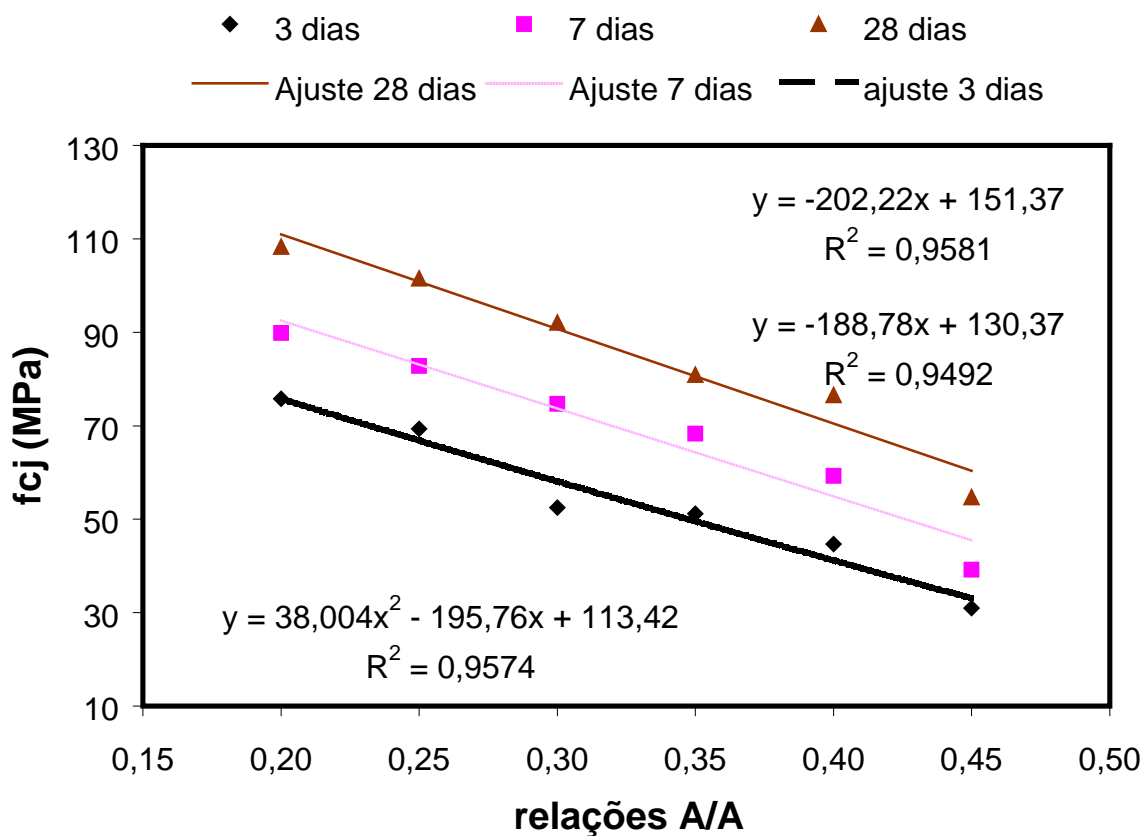


Figura 6.6. Correlações  $f_c$  x relação A/A para o método Aitcin.

### 6.2.3 RESULTADOS DO MÉTODO IPT/EPUSP MODIFICADO

A seguir estão apresentados, na Tabela 6.6, os resultados obtidos pela da ruptura dos CPs moldados com concretos dosados pelo método *IPT/EPUSP modificado*, os quais foram confeccionados com concretos identificados como: IPT-040, IPT-035, IPT-030, IPT-025 e IPT-020.

Na Figura 6.7 estão apresentadas as curvas que correlacionam as resistências médias ( $f_{cj}$ ), com as suas respectivas relações A/A aos 3, 7 e 28 dias. Na mesma figura estão evidenciadas as equações de ajuste com seus correspondentes  $R^2$ .

Tabela 6.6. Resultados à compressão - método *IPT/EPUSP modificado*.

IPT/ EPUSP modific.	fcj 3 dias MPa		Média 3 dias MPa	Fcj 7 dias MPa		Média 7 dias MPa	fcj 28 dias MPa		Média 28 dias MPa
	R1	R2		R1	R2		R1	R2	
<b>IPT-040</b>	36,8	40,4	<b>37,9</b>	46,9	51,2	<b>48,8</b>	64,6	65,6	<b>63,5</b>
	36,6	38,9		49,2	50,3		66,2	60,1	
	38,0	36,4		48,3	46,8		62,7	61,9	
<i>D<sub>Pad</sub></i> =	0,8	2,1	1,6	1,1	2,3	1,8	1,8	2,8	2,4
<i>CV (%)</i> =	2,0	5,4	4,2	2,4	4,7	3,7	2,7	4,5	3,7
<b>IPT-035</b>	42,0	50,0	<b>49,8</b>	63,0	60,1	<b>63,1</b>	71,0	81,7	<b>77,2</b>
	52,5	52,7		64,4	65,2		76,4	78,1	
	48,3	53,3		61,5	64,4		78,3	78,0	
<i>D<sub>Pad</sub></i> =	5,3	1,8	4,3	1,4	2,7	2,0	3,8	2,1	3,5
<i>CV (%)</i> =	11,0	3,4	8,6	2,3	4,3	3,1	5,0	2,7	4,5
<b>IPT-030</b>	57,3	56,4	<b>55,5</b>	66,3	69,6	<b>67,7</b>	84,5	84,4	<b>82,0</b>
	51,3	53,9		66,9	67,9		79,7	79,9	
	60,2	53,9		68,1	67,6		81,6	82,1	
<i>D<sub>Pad</sub></i> =	4,5	1,4	3,1	0,9	1,1	1,1	2,4	2,2	2,1
<i>CV (%)</i> =	8,0	2,6	5,6	1,4	1,6	1,7	3,0	2,7	2,5
<b>IPT-025</b>	77,6	66,1	<b>73,3</b>	72,7	84,4	<b>82,5</b>	88,2	92,5	<b>88,6</b>
	65,0	77,6		81,9	87,8		93,2	93,9	
	74,5	79,1		72,3	95,7		82,8	81,1	
<i>D<sub>Pad</sub></i> =	6,5	7,1	6,2	5,4	5,8	9,0	5,2	7,0	5,6
<i>CV (%)</i> =	9,0	9,6	8,5	7,2	6,5	10,9	5,9	7,9	6,3
<b>IPT-020</b>	82,1	70,6	<b>77,8</b>	97,0	100,2	<b>95,7</b>	104,6	107,8	<b>101,6</b>
	79,8	78,5		95,7	96,9		104,9	94,0	
	80,6	75,2		91,0	93,7		94,5	104,0	
<i>D<sub>Pad</sub></i> =	1,2	4,0	4,2	3,2	3,2	3,2	5,9	7,1	5,9
<i>CV (%)</i> =	1,4	5,3	5,4	3,4	3,3	3,3	5,8	7,0	5,8

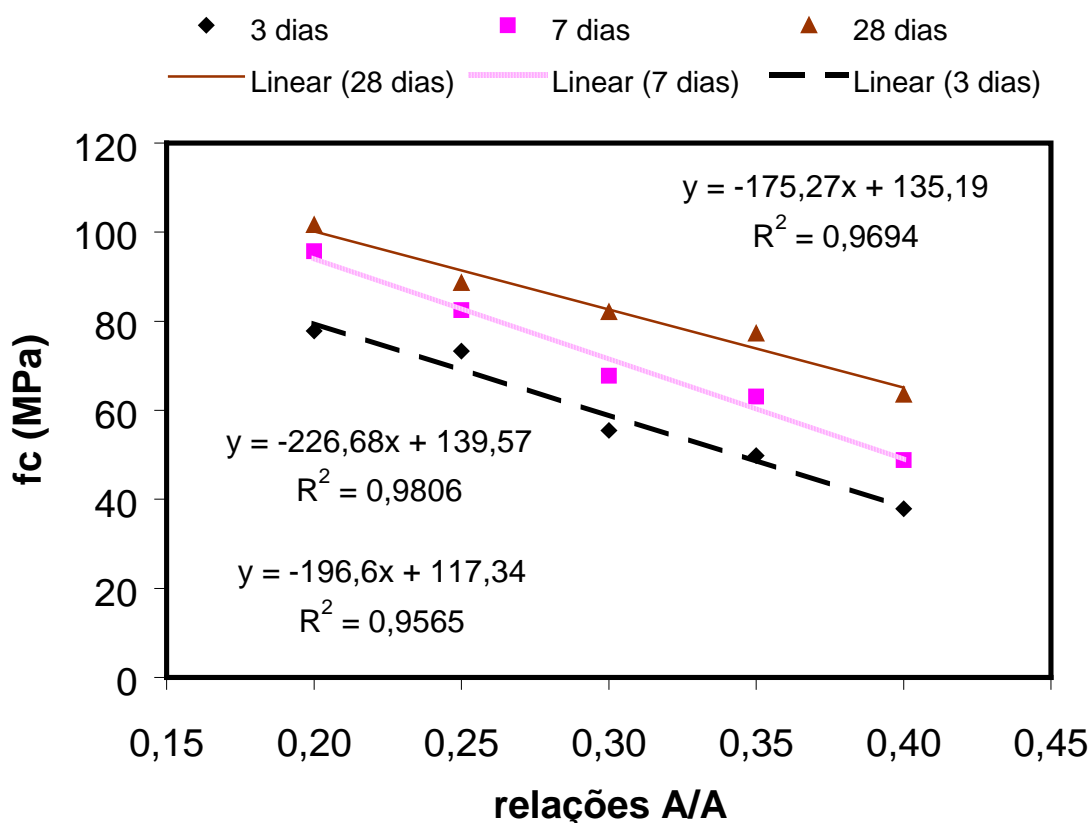


Figura 6.7. Correlações  $f_c$  x relação A/A para o método *IPT/EPUSP modificado*.

### 6.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste item são feitas análises sobre a qualidade dos valores resultantes dos ensaios à compressão com a finalidade de assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos. Para a validação dos resultados, utilizou-se estudos estatísticos, considerações técnicas e comparações com outros resultados de estudos semelhantes.

#### 6.3.1 ANÁLISE DOS DESVIOS PADRÃO E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO

Com os resultados dos ensaios à compressão mostrados nas Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6, relativos aos métodos *Mehta/Aitcin*, *Aitcin* e *IPT/EPUSP modificado* respectivamente, foram montadas as Tabelas 6.7, 6.8 e 6.9 que contém os desvios padrão (Dpad) e coeficientes de variação (CV%) calculados para cada dosagem.

Fazendo-se comparações dos valores dos desvios padrão (DPad) e os coeficientes de variação (CV%) dessas tabelas, com os apresentados em outros trabalhos verificou-se que:

- os números desta pesquisa, em relação aos resultados apresentados em ALVES (2000), são da mesma ordem de grandeza. Como em ALVES (2000) ambos são também crescentes com o aumento da tensão de ruptura à compressão;
- os valores aqui apresentados são superiores aos apresentados em MENDES (2002). Deduz-se que este aumento é decorrente de uma pior forma de acabamento do topo dos CPs. O torno de desbaste retificador usado em MENDES (2002) não está mais disponível, por isso nesta pesquisa utilizou-se a técnica de retificar os topos dos CPs com uma máquina de corte e posterior capeamento destes com uma camada fina de argamassa de enxofre;
- os valores são da mesma ordem de grandeza dos valores utilizados pela concreteira da região de Curitiba, fornecedora de informações utilizadas no estudo de caso mostradas no item 6.5.

Tabela 6.7. DPad e CV% para o método *Mehta/Aïtcin*.

MEHTA / AÏTCIN	3 dias			7 dias			28 dias		
	Média (Mpa)	DPad (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DPad (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	Dpad (MPa)	CV (%)
MEH-045	36,9	2,6	7,1	43,6	4,0	9,3	58,0	5,7	9,8
MEH-037	50,1	2,9	5,8	56,8	5,7	10,1	74,6	6,5	8,7
MEH-031	58,1	4,7	8,1	67,0	7,0	10,5	86,2	8,7	10,1
MEH-026	68,2	5,5	8,0	81,5	7,3	8,9	98,5	11,5	11,6
MEH-023	76,6	5,2	6,7	88,6	8,4	9,5	100,8	13,3	13,2
MEH-019	82,7	6,3	7,6	91,5	7,4	8,1	108,5	5,9	5,5

Tabela 6.8. DPad e CV% para o método *Aïtcin*.

AÏTCIN	3 dias			7 dias			28 dias		
	Média (Mpa)	Dpad (Mpa)	CV (%)	Média (MPa)	DPad (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	Dpad (MPa)	CV (%)
AIT-045	31,0	1,7	5,4	39,2	3,1	7,8	54,7	2,9	5,2
AIT-040	44,7	3,6	8,1	59,3	4,7	7,9	76,5	2,6	3,4
AIT-035	51,2	4,8	9,4	68,3	3,3	4,9	80,8	2,1	2,6
AIT-030	52,5	5,5	10,4	74,7	2,7	3,6	92,0	2,6	2,8
AIT-025	69,4	6,1	8,8	82,8	6,1	7,3	101,5	5,7	5,6
AIT-020	75,8	10,0	13,2	89,9	6,3	7,0	108,3	4,5	4,1

Tabela 6.9. DPad e CV% para o método *IPT/EPUSP modificado*.

IPT/EPUSP Modificado	3 dias			7 dias			28 dias		
	Média (Mpa)	DPad (Mpa)	CV (%)	Média (MPa)	DPad (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	Dpad (MPa)	CV (%)
<b>IPT-040</b>	37,9	1,6	4,2	48,8	1,8	3,7	63,5	2,4	3,7
<b>IPT-035</b>	49,8	4,3	8,6	63,1	2,0	3,1	77,2	3,5	4,5
<b>IPT-030</b>	55,5	3,1	5,6	67,7	1,1	1,7	82,0	2,1	2,5
<b>IPT-025</b>	73,3	6,2	8,5	82,5	9,0	10,9	88,6	5,6	6,3
<b>IPT-020</b>	77,8	4,2	5,4	95,7	3,2	3,3	101,6	5,9	5,8

### 6.3.2 ANÁLISE DAS CURVAS DE AJUSTE

Com os valores dos resultados à compressão e as relações A/A, para cada método e idade, fez-se um ajuste de curvas representativas das tendências destes valores, calculando-se além das equações, também seus respectivos  $R^2$ . Observa-se que os  $R^2$  obtidos são todos altos e indicam bons ajustes destas curvas. As equações ajustadas assim como os  $R^2$  calculados estão apresentados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10. Equações ajustadas e respectivos  $R^2$ .

Método	Idade	EQUAÇÕES DE AJUSTE	$R^2$
<b>MEHTA-AİTCIN</b>	3 dias	$y = 153,44.x^2 - 276,04.x + 130,25$	0,9955
	7 dias	$y = 57,202.x^2 - 233,04.x + 136,16$	0,9851
	28 dias	$y = -110,89x^2 - 124,79x + 136,35$	0,9964
<b>AİTCIN</b>	3 dias	$y = 38,004.x^2 - 195,76.x + 113,42$	0,9574
	7 dias	$y = -188,78.x + 130,37$	0,9492
	28 dias	$y = -202,22.x + 151,37$	0,9581
<b>IPT/EPUSP Modificado</b>	3 dias	$y = -79,227.x^2 - 159,25.x + 114,14$	0,9706
	7 dias	$y = 229,07.x^2 - 364,12.x + 159,04$	0,9841
	28 dias	$y = 10,817.x^2 - 181,76.x + 136,11$	0,9694

Comparando os valores de  $R^2$  desta tabela com os apresentados em outros trabalhos, verifica-se que os  $R^2$  desta pesquisa são de grandeza semelhante aos apresentados em ALVES (2000) e MENDES (2002).



### 6.3.3 ANÁLISE DOS VALORES POTENCIAIS

Os valores potenciais são os maiores resultados obtidos pela ruptura à compressão do total de seis CPs em cada uma das idades de 3, 7 e 28 dias. Estes CPs foram moldados nas duas repetições produzidas com cada método de dosagem e diferentes relações A/A. Os valores potenciais obtidos estão mostrados nas Tabelas 6.11, 6.12 e 6.13.

Tabela 6.11. Valores potenciais do método *Mehta/Aitcin*.

Dosagem	A/A	3 dias	7 dias	28 dias
MEH-045	0,45	41,3	48,7	64,2
MEH-037	0,37	53,1	65,6	84,3
MEH-031	0,31	65,6	75,6	97,7
MEH-026	0,26	76,1	90,7	115,4
MEH-023	0,23	83,6	97,4	117,2
MEH-019	0,19	94,3	100,7	116,6

Tabela 6.12. Valores potenciais do método *Aitcin*.

Dosagem	A/A	3 dias	7 dias	28 dias
AIT-045	0,45	33,3	44,6	59,7
AIT-040	0,40	47,1	65,5	79,4
AIT-035	0,35	58,9	74,5	83,7
AIT-030	0,30	56,2	77,6	96,7
AIT-025	0,25	77,6	88,2	109,6
AIT-020	0,20	85,8	96,6	112,6

Tabela 6.13. Valores potenciais do método *IPT/EPUSP modificado*.

Dosagem	A/A	3 dias	7 dias	28 dias
IPT-040	0,40	40,4	51,2	66,2
IPT-035	0,35	53,3	65,2	81,7
IPT-030	0,30	60,2	69,6	84,5
IPT-025	0,25	79,1	95,7	93,9
IPT-020	0,20	82,1	100,2	107,8

Por intermédio dos gráficos gerados com os valores potenciais, mostrados nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10, são visíveis as tendências de evolução dos ganhos de resistência à compressão de acordo com a redução da relação A/A e aumento da idade dos concretos.

Nestes gráficos, também são perceptíveis pontos que revelam a dificuldade de alcançar a resistência esperada, em algumas idades, provavelmente devido aos já citados problemas com a regularização dos topos dos CPs. Em especial, para a ruptura dos CPs confeccionados com a dosagem IPT-025, percebe-se claramente esta dificuldade. Salienta-se que mesmo com estes problemas pontuais, as médias e desvios padrão foram razoáveis e causaram pouco efeito sobre o objetivo de se comparar os métodos de dosagem.

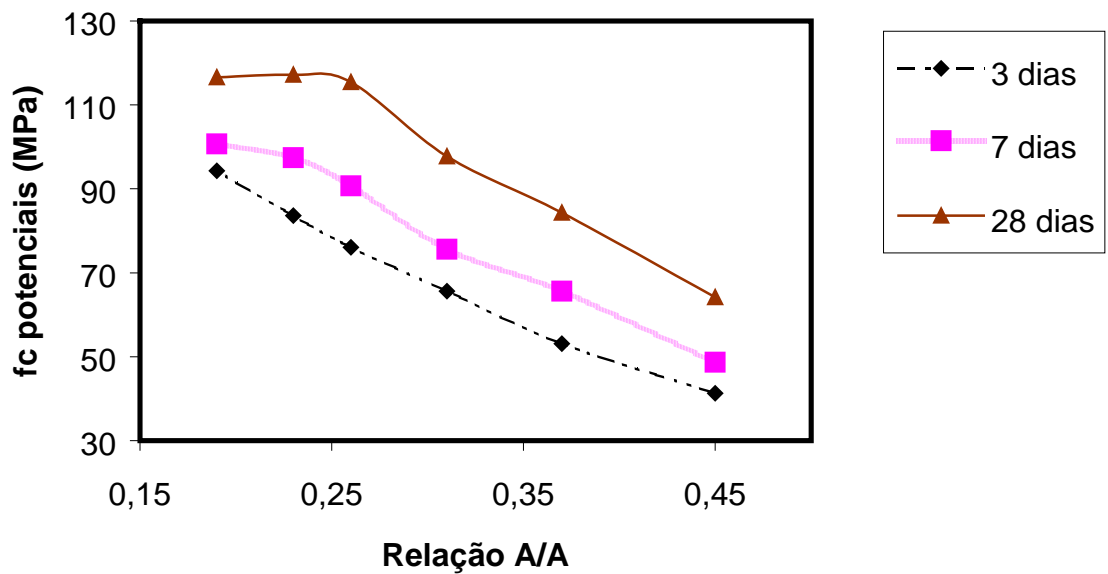


Figura 6.8. Evolução dos valores potenciais do método *Mehta/Aïtcin*.

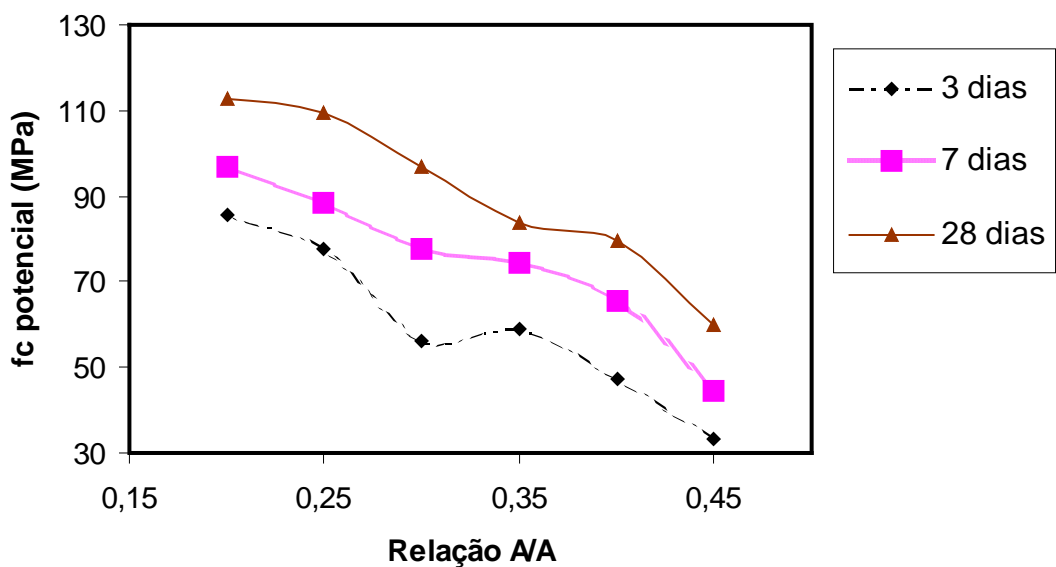


Figura 6.9. Evolução dos valores potenciais do método *Aïtcin*.

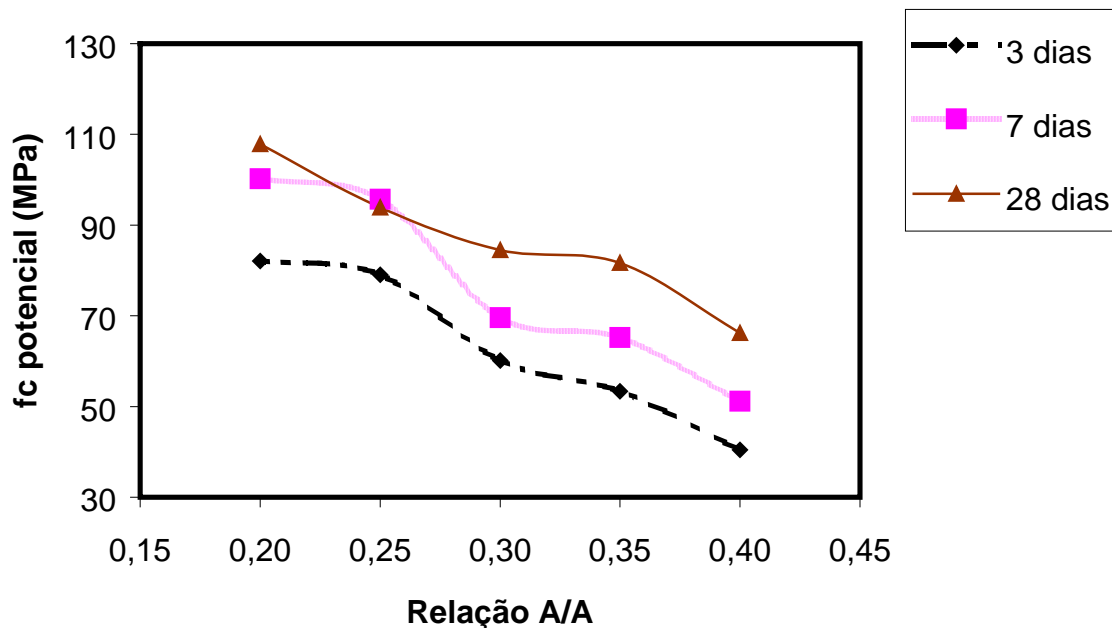


Figura 6.10. Evolução dos valores potenciais do método *IPT/EPUSP modificado*.

Especificamente observa-se que os desvios padrão e coeficientes de variação dos resultados obtidos com o método *Mehta/Aitcin* são relativamente maiores que para os demais métodos. Supõe-se que este fato é devido a que se produziu os concretos pelo *Mehta/Aitcin*, aproximadamente noventa dias após os outros métodos, com cimento da mesma data de fabricação. Salienta-se que o cimento estava armazenado em tambores de aço hermeticamente fechados. Este atraso deveu-se a um problema com as dosagens iniciais feitas com o método *Mehta/Aitcin*. Estas dosagens iniciais foram descartadas quando se percebeu um problema com a transformação volumétrica, dos percentuais de sílica ativa e cimento, para as quantidades por peso utilizadas.

#### 6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS MÉTODOS DE DOSAGEM

Para comparar os métodos observaram-se os resultados gerados sob dois enfoques diferentes. No primeiro, analisou-se o desempenho dos métodos quanto ao total dos custos dos materiais nos concretos produzidos; posteriormente, analisou-se o desempenho dos métodos quanto ao consumo dos dois componentes mais significativos nos custos, o cimento e o superplastificante.

O motivo pelo qual se analisou destas duas maneiras diferentes é que os custos da sílica ativa e do aditivo superplastificante são bastante altos e acredita-se que ambos, talvez, diminuam nos próximos anos. A sílica ativa devido a aumentos na concorrência entre fabricantes e escala de produção; e o superplastificante de terceira geração, pelo que ocorreu com os aditivos das gerações anteriores. Portanto, por este aspecto, o consumo de cimento deverá passar a ser o fator predominante no custo dos CAR.

#### 6.4.1 ANÁLISE QUANTO AOS CUSTOS DOS CONCRETOS

Para a análise dos custos dos concretos foram levantados, no mês de abril de 2005, junto aos fornecedores relacionados a cada material para a região metropolitana de Curitiba, os valores dos insumos já com impostos e custos de transporte incluídos, como são comercializados e por pesos, estão apresentados na Tabela 6.15. Para se obter os valores dos agregados por volume ( $m^3$ ), a partir dos valores em pesos (kg), foi necessário se utilizar as informações da Tabela 6.14.

Tabela 6.14. Informações sobre os agregados.

<b>AREIA</b>	
Umidade de recebimento h %	7,0
Coefficiente de inchamento (CI) para h=7,0%	1,33
Massa unitária (UM)	1,49
<b>BRITA</b>	
Massa Unitária (UM)	1,42

Tabela 6.15. Custos dos materiais utilizados na pesquisa.

<b>MATERIAL</b>	<b>Forma de venda</b>	<b>Valor</b>	<b>R\$ / kg</b>
Cimento	Granel p/ 1.000 kg	R\$ 285,00	0,285
Sílica ativa	sacos 15 kg	R\$ 21,85 p/ saco	1,457
Brita	granel p/ $m^3$	R\$ 25,00 / $m^3$	0,01813
Areia	granel p/ $m^3$	R\$ 26,00 / $m^3$	0,02321
Aditivo SP	granel p/ kg	R\$ 14,30 / kg	14,30

A partir das Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 que apresentam os consumos dos materiais para os métodos *Aïtcin*, *Mehta/Aïtcin* e *IPT/EPUSP modificado* e da Tabela 6.15 que contém seus custos individuais, montou-se a Tabela 6.16, na qual são apresentados os custos médios das dosagens R1 e R2 para cada um dos concretos. Cabe aqui ressaltar que os valores calculados são relativos unicamente aos custos dos materiais utilizados para a produção dos concretos.

Reunindo-se os custos totais de cada concreto, da Tabela 6.16, em conjunto com as resistências para os 3, 7 e 28 dias, já apresentadas nas Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6, montou-se a Tabela 6.17, com o intuito de analisar o desempenho quanto aos custos de cada método para a faixa de resistências à compressão estudadas.

Tabela 6.16. Custos por materiais dos concretos produzidos.

<b>Dosagem</b>	<b>Cimento (R\$)</b>	<b>Sílica ativa (R\$)</b>	<b>Brita (R\$)</b>	<b>Areia (R\$)</b>	<b>Adit. SP (R\$)</b>	<b>Total R\$</b>
<b>MEH-019</b>	167,30	74,29	19,56	14,39	380,55	<b>656,08</b>
<b>MEH-023</b>	155,61	68,46	19,24	14,78	196,42	<b>454,52</b>
<b>MEH-026</b>	147,63	65,55	18,94	15,20	101,53	<b>348,85</b>
<b>MEH-031</b>	135,66	59,72	18,64	15,60	61,44	<b>291,07</b>
<b>MEH-037</b>	123,69	55,35	18,33	15,99	47,50	<b>260,86</b>
<b>MEH-045</b>	111,72	49,53	18,03	16,38	36,47	<b>232,13</b>
<b>AIT-020</b>	176,99	78,66	18,49	13,97	418,28	<b>706,38</b>
<b>AIT-025</b>	141,65	62,64	18,49	16,78	257,40	<b>496,95</b>
<b>AIT-030</b>	117,99	52,44	18,49	18,73	182,33	<b>389,97</b>
<b>AIT-035</b>	101,18	45,16	18,49	20,03	147,19	<b>332,04</b>
<b>AIT-040</b>	88,64	39,33	18,49	21,05	128,89	<b>296,39</b>
<b>AIT-045</b>	78,66	34,96	18,49	21,79	114,40	<b>268,30</b>
<b>IPT-020</b>	198,93	88,41	21,91	12,33	589,18	<b>910,75</b>
<b>IPT-025</b>	158,18	70,24	21,65	15,81	488,81	<b>754,67</b>
<b>IPT-030</b>	131,10	58,26	21,57	17,99	405,16	<b>634,08</b>
<b>IPT-035</b>	112,01	49,78	21,51	19,53	325,79	<b>528,61</b>
<b>IPT-040</b>	97,76	43,39	21,44	20,74	247,50	<b>430,82</b>

Com os valores da Tabela 6.17, montou-se os gráficos das Figuras 6.11, 6.12 e 6.13, em que para cada método, está traçada uma curva de custos relativa às faixas de resistências à compressão aos 28, 7 e 3 dias.

Dentro destas figuras, também foram traçadas parábolas do segundo grau ajustadas pelo método dos mínimos erros quadráticos para cada método de dosagem, sendo mostrados também os  $R^2$  calculados.

Observa-se no gráfico para os 28 dias, da Figura 6.11 que a curva relativa ao método *Mehta/Aiřcin* está sempre abaixo da curva dos demais métodos, para a faixa de resistências analisada. Portanto o método *Mehta/Aiřcin*, para esta faixa de resistências, com os materiais analisados e com os custos atuais destes, é o que produz concretos, para resistências à compressão aos 28 dias, com menor custo. É importante observar que a curva relativa ao método *Aiřcin* está bastante próxima a gerada pelo método *Mehta/Aiřcin*, salientando que o primeiro otimiza o consumo de cimento, como ver-se-á a seguir, e o segundo otimiza, principalmente, o aditivo superplastificante.

Tabela 6.17. Custos e resistências dos concretos produzidos.

Método de Dosagem	Custo R\$	IDADES (fc)		
		3d	7d	28d
<b>AIT-020</b>	<b>706,38</b>	75,8	89,9	108,3
<b>AIT-025</b>	<b>496,95</b>	69,4	82,8	101,5
<b>AIT-030</b>	<b>389,97</b>	52,5	74,7	92,0
<b>AIT-035</b>	<b>332,04</b>	51,2	68,3	80,8
<b>AIT-040</b>	<b>296,39</b>	44,7	59,3	76,5
<b>AIT-045</b>	<b>268,30</b>	31,0	39,2	54,7
<b>MEH-019</b>	<b>656,08</b>	82,7	91,5	108,5
<b>MEH-023</b>	<b>454,52</b>	76,6	88,6	100,8
<b>MEH-026</b>	<b>348,85</b>	68,2	81,5	98,5
<b>MEH-031</b>	<b>291,07</b>	58,1	67,0	86,2
<b>MEH-038</b>	<b>260,86</b>	50,1	56,8	74,6
<b>MEH-045</b>	<b>232,13</b>	36,9	43,6	58,0
<b>IPT-020</b>	<b>910,75</b>	77,8	95,7	101,6
<b>IPT-025</b>	<b>754,67</b>	73,3	82,5	88,6
<b>IPT-030</b>	<b>634,08</b>	55,5	67,7	82,0
<b>IPT-035</b>	<b>528,61</b>	49,8	63,1	77,2
<b>IPT-040</b>	<b>430,82</b>	37,9	48,8	63,5

É interessante estabelecer uma comparação com o artigo ALVES *et al* (2003), em que foram revelados os custos dos concretos dosados através dos métodos *Mehta/Aïtcin*, *Aïtcin*, *IPT/EPUSP* e *Toralles Carbonari*, aplicando materiais da região de Porto Alegre e superplastificante a base de naftaleno sulfonado de segunda geração. No artigo conclui-se que na faixa entre 57 a 72 MPa também o método *Mehta/Aïtcin* produziu concretos mais baratos. Acima desta faixa, dos 75 aos 85 MPa estudados, o *Aïtcin* proporcionou custos mais baixos. Esta diferença tem como origem o superplastificante a base de naftaleno sulfonado utilizado em ALVES *et al* (2003), onde é citado o preço de US\$ 3,33/kg, (equivalente hoje a R\$ 8,30/kg), valor embora relativamente alto para este tipo de aditivo de segunda geração, se comparado ao aditivo semelhante utilizado em MENDES (2002) de preço R\$ 3,80/kg, é significativamente mais barato que o aditivo de terceira geração aplicado nesta pesquisa.

Analisando os custos dos concretos produzidos por esta pesquisa para as idades de três e sete dias, através dos gráficos das Figuras 6.12 e 6.13, onde estão traçadas as curvas de custos com as resistências à compressão aos sete e três dias. Observa-se que a curva do método *Mehta/Aïtcin* gera custos nitidamente menores, com uma margem de diferença mais significativa sobre os demais métodos.

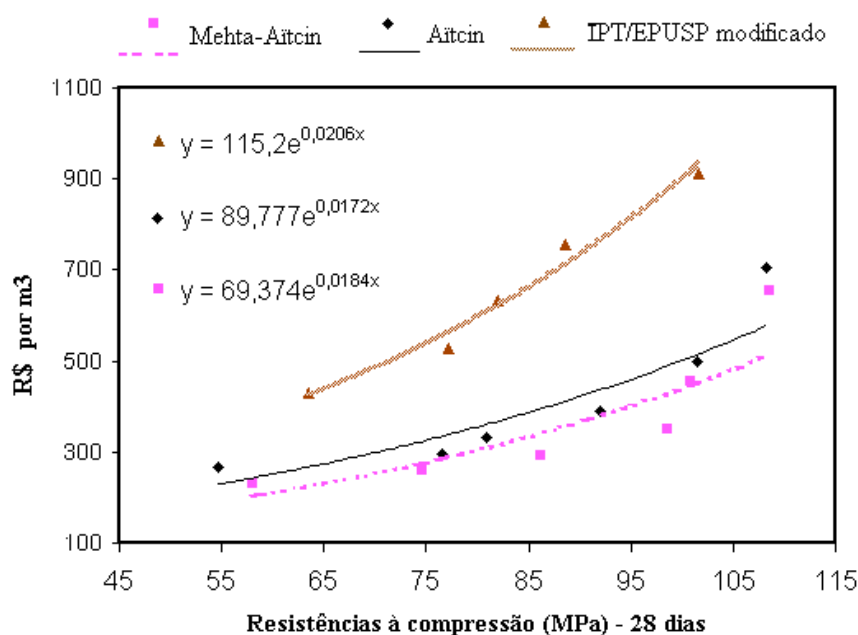


Figura 6.11. Custos dos concretos pelas resistências aos 28 dias.

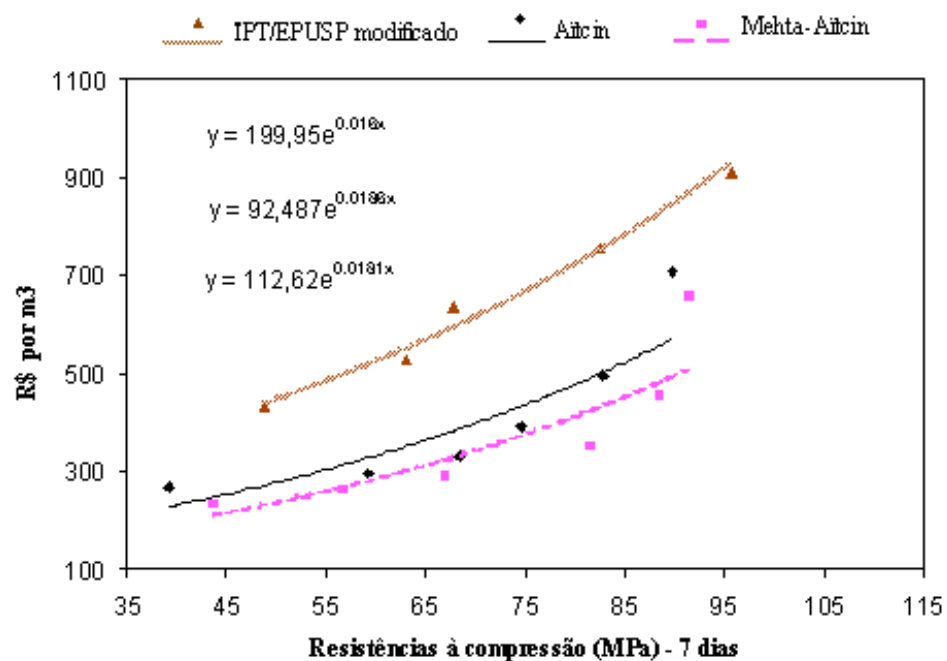


Figura 6.12. Custos dos concretos pelas resistências aos 7 dias.

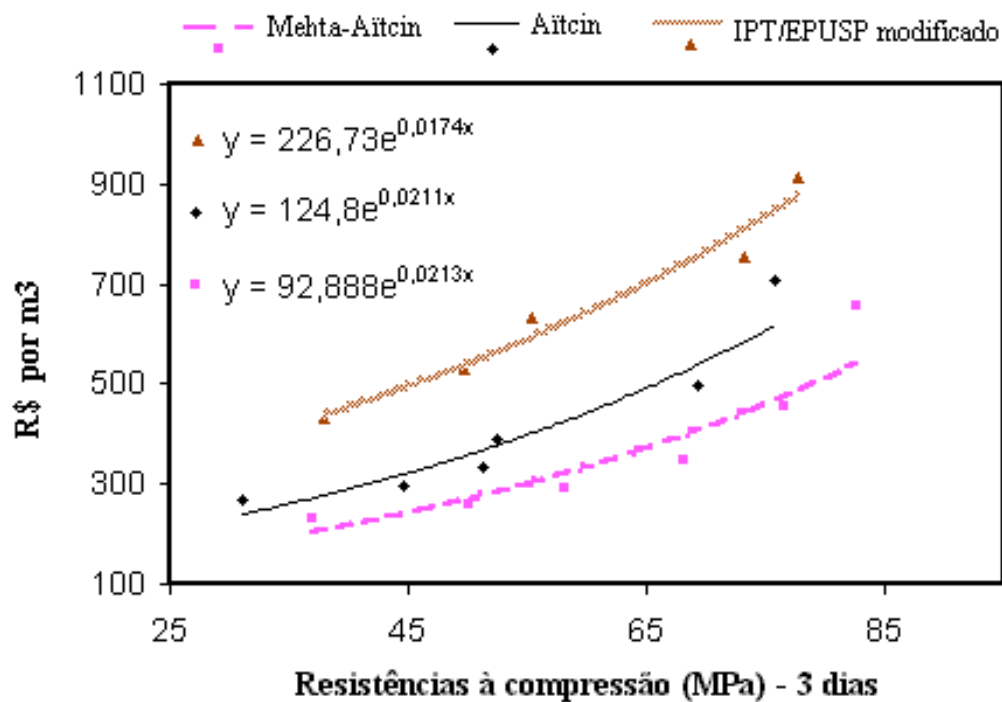


Figura 6.13. Custos dos concretos pelas resistências aos 3 dias.



A Tabela 6.16, também, possibilita observar a importância de cada material sobre os custos totais dos concretos. Com a finalidade de facilitar esta análise a partir dos dados desta tabela, foi traçado o gráfico da Figura 6.14, com os percentuais relativos dos custos para cada material nas dosagens do método *Mehta/Aïtcin*. Observando esta figura percebe-se a relevância do custo do aditivo superplastificante utilizado e do impacto do custo do cimento e da sílica ativa, principalmente. Com o aumento da resistência à compressão cresce a importância relativa dos custos destes. É visível também que para a dosagem MEH-019, que atingiu a resistência de 116,6 MPa aos 28 dias, o percentual relativo ao custo do superplastificante tornou-se extremo, mesmo com altíssimo consumo de cimento obtido ( $587 \text{ kg/m}^3$ ), e o custo dos agregados ficou quase irrelevante.

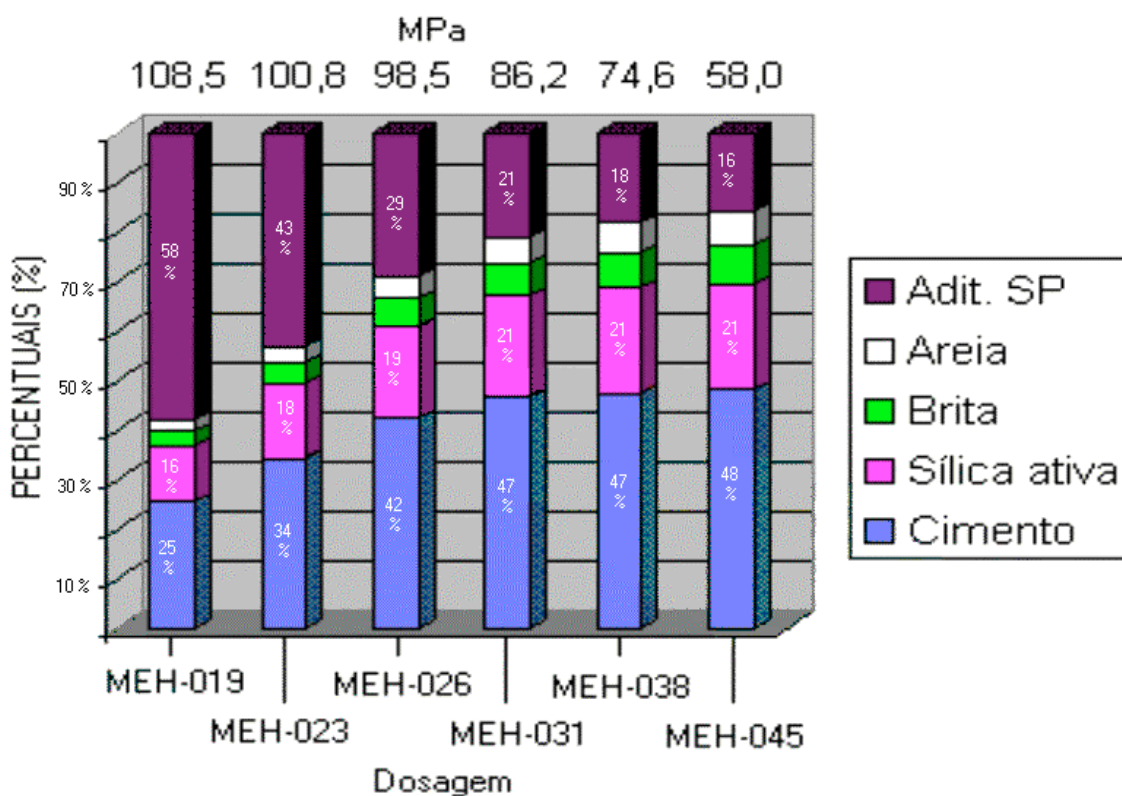


Figura 6.14. Porcentagens dos custos dos materiais para as dosagens pelo método Mehta/Aïtcin.

É importante a comparação com os resultados com os obtidos por MENDES (2002), onde o autor produziu concretos dosando-os pelo método de *Aïtcin* utilizando os mesmos cimento e agregados, mas aplicou um aditivo superplastificante a base de naftaleno sulfonado de segunda geração, obtendo resistências na faixa dos 75 aos 100 MPa. Na Tabela 6.18 são mostrados os resultados de resistência e consumos de materiais apresentados em MENDES (2002), cujos valores para os custos estão atualizados para abril de 2005. Com esses resultados e os obtidos nesta pesquisa foi montada a Figura 6.15, onde se observa que os custos obtidos com as dosagens de MENDES (2002) são inferiores.

Analisando os consumos dos concretos produzidos em MENDES (2002) com superplastificante de segunda geração a base de naftaleno sulfonado de custo atualizado de R\$ 3,80/kg, para os concretos produzidos nesta pesquisa alcançarem os custos com os primeiros, o superplastificante de terceira geração à base éter carboxílico modificado teria que custar R\$ 4,50/kg e não os atuais R\$ 14,30/kg.

Tabela 6.18. Resultados de MENDES (2002).

<b>Dosagem</b>	<b>fc 28 d</b>	<b>Cimento (kg)</b>	<b>Sílica ativa (kg)</b>	<b>Brita (kg)</b>	<b>Areia (kg)</b>	<b>Adit. SP (kg)</b>	<b>Custo R\$</b>
A	77,7	362	31	1053	839	12,4	R\$ 233,38
B	83,6	409	35	1055	796	13,9	R\$ 257,49
C	94,1	455	39	1059	745	15,7	R\$ 282,12
D	99,2	486	42	1052	722	19,5	R\$ 309,14

Conclui-se que no presente momento, com o uso do aditivo superplastificante de terceira geração aplicado nesta pesquisa e seu atual custo, ainda não se consegue produzir CAR até os 100 MPa mais eficientes sobre o ponto de vista de custo do que com o uso do aditivo superplastificante à base de naftaleno sulfonado aplicado em MENDES (2002). Cabe ressaltar que os aditivos de terceira geração, à base éter carboxílico modificado, como o utilizado nesta pesquisa, segundo o fabricante, a perda de abatimento é bem mais lenta, permitindo um maior período para a aplicação do concreto sem necessidade de re-dosagens. Sugere-se pesquisar a avaliação dos impactos técnicos e financeiros dessas re-dosagens sobre os CAR.

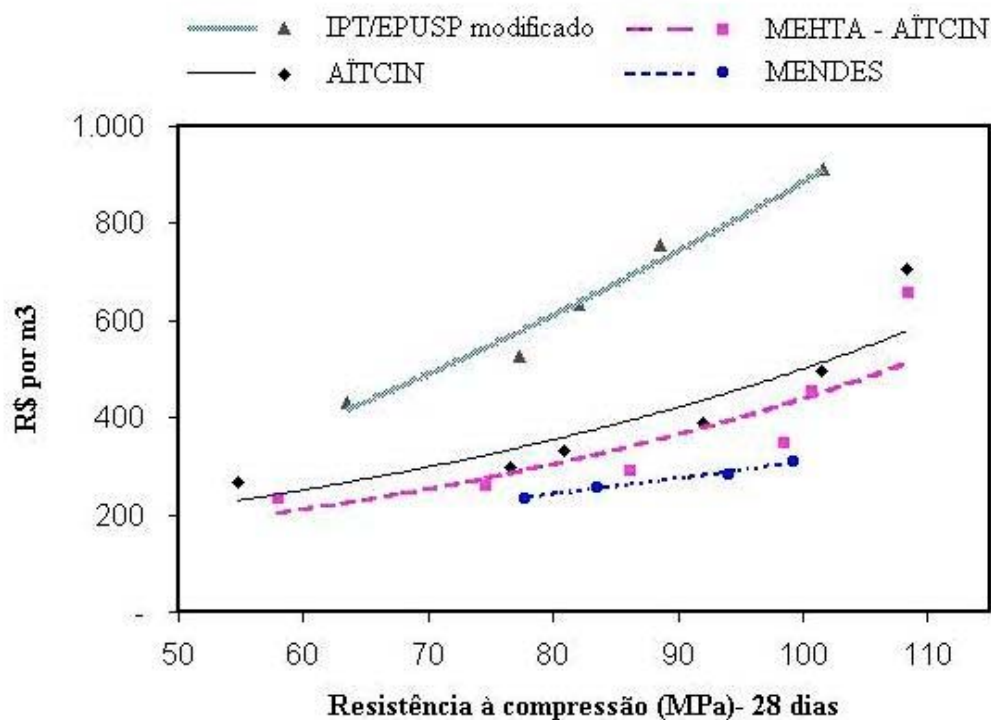


Figura 6.15. Resultados desta pesquisa em conjunto com os de MENDES (2002).

#### 6.4.2 ANÁLISE QUANTO AOS CONSUMOS DE CIMENTO

A partir dos consumos de cimento por metro cúbico de concreto mostrados nas Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 para os métodos *Aitcin*, *Mehta/Aitcin* e *IPT/EPUSP modificado* respectivamente, e das resistências médias apresentadas nas Tabelas 6.4, 6.5 e 6.6 para as diferentes resistências pelos mesmos métodos de dosagem, obteve-se o gráfico da Figura 6.16. Neste gráfico observa-se que para a faixa de resistências à compressão estudadas, 50 a 105 MPa, aos 28 dias, é o método *Aitcin* o que possibilita a produção de concretos com os menores consumos de cimento.

Comparando-se os resultados obtidos neste trabalho, aos 28 dias, com os produzidos nos estudos citados no item 2.5, observa-se uma similaridade. O estudo de ALVES (2000), para materiais da região metropolitana de Porto Alegre-RS, com faixa de resistências à compressão entre 50 e 85 MPa, em que foram comparados os métodos *Mehta/Aitcin*, *Toralles-Carbonari*, *Aitcin* e *IPT/EPUSP* (este para concretos convencionais), o mesmo método *Aitcin* produziu concretos com os menores consumos de cimento.

Já, no estudo realizado por PINTO *et al.* (2003), que comparou os métodos *Mehta/Aïtcin*, *Aïtcin* e *Furnas* para concretos convencionais, usando materiais disponíveis na região metropolitana de Goiânia-GO, dois métodos produziram concretos com menores consumos de cimento: o método *Furnas*, na faixa dos 70 aos 85 MPa e o método *Aïtcin* de 85 até 130 MPa. O trabalho de PINHO *et al.* (2004), comparou os métodos *IPT/EPUSP modificado* e *Aïtcin*, utilizando materiais da região metropolitana de Belém-PA, local que devido aos agregados disponíveis é difícil de obter resistências elevadas, produziu resistências de 30 a 55 MPa e, também, chegou à conclusão de que o método *Aïtcin* gerou consumos de cimento menores.

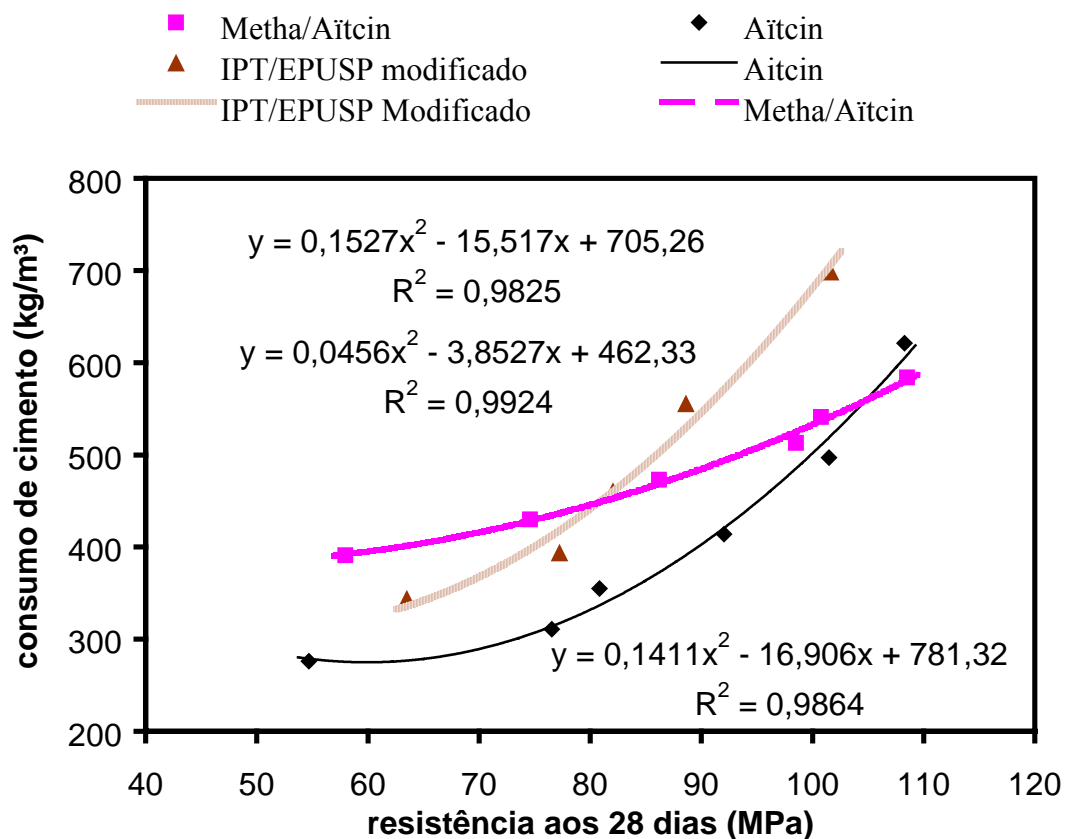


Figura 6.16. Consumos de cimento pelas resistências à compressão, aos 28 dias.

A partir dos consumos de cimento mostrados nas Tabelas 5.11, 5.12 e 5.13, e resistências médias aos 3 dias, apresentadas nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, gerou-se o gráfico da Figura 6.17. Observa-se nesta idade que o gráfico é ligeiramente diferente aos 28 dias.

Para resistências à compressão aos 3 dias, na faixa dos 50 MPa até 65 MPa o método *Aïtcin* continua gerando consumos de cimento menores. Já acima dos 65 MPa é o método *Mehta/Aïtcin* quem gera consumos de cimento menores.

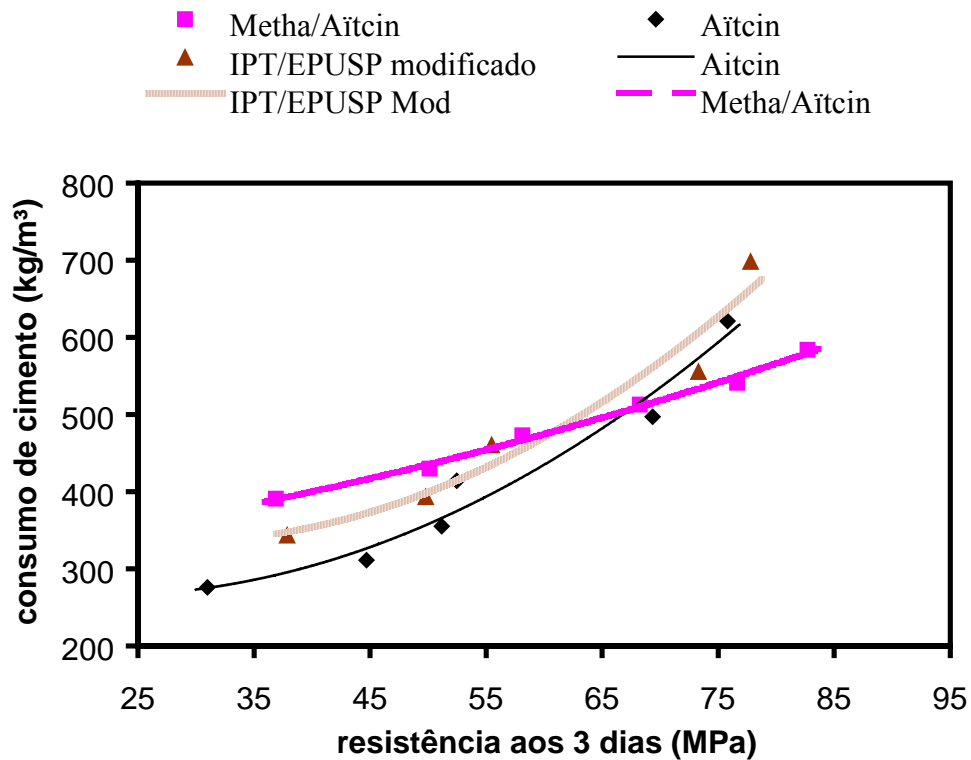


Figura 6.17. Consumos de cimento pelas resistências à compressão aos 3 dias

Observando os custos dos materiais mostrados na Tabela 6.16 em conjunto com a análise sobre os consumos de cimento, levando em conta a já citada provável evolução dos custos do aditivo superplastificante utilizado e da sílica ativa, espera-se que o método *Aïtcin* venha a permitir a produção de CAR com custos menores no futuro. Um assunto interessante para pesquisas futuras seria, utilizando os materiais desta pesquisa, um estudo para a otimização da relação de consumos de água e superplastificante para o método *Aïtcin*.

## **6.5 ESTUDO COMPARATIVO DA APLICAÇÃO DE CAR NO CASO DO EVOLUTION TOWERS**

Com a finalidade de melhor avaliar os resultados obtidos nesta pesquisa, quanto a relação custo/benefício dos concretos produzidos, neste item fez-se um estudo de caso comparativo da aplicação de CAR com diferentes resistências características à compressão na estrutura do conjunto de edifícios Evolution Towers em Curitiba-PR.

O conjunto arquitetônico Evolution Towers, concluído em 2004, é composto por três torres que se sobrepõem parcialmente (Flat, Residencial e Corporativo), com 46.210 m<sup>2</sup> de área construída, tendo a torre mais alta 37 pavimentos e 132 m de altura, conforme mostrado na Figuras 6.18 e 6.19. A obra foi construída pela empresa Irmãos Thá S/A e o seu projeto estrutural ficou sob a responsabilidade da empresa TESC Projetos Estruturais S/C Ltda., ambas de Curitiba-PR.

A estrutura do Evolution Towers foi executada em concreto armado, pela aplicação de um total superior a 14.000 m<sup>3</sup> de concreto nas torres, sendo estes das classes C 60 até a C 20. Mais detalhes são apresentados na Tabela 6.19. Os pilares dos seis primeiros pavimentos do edifício corporativo foram executados em CAD C 60.

Já nos estudos iniciais do projeto estrutural da obra, observou-se a viabilidade de aplicação de CAR nos pilares do edifício Corporativo, mostrado na Figura 6.20, com a finalidade de minorar suas dimensões e melhorar a utilização dos pavimentos de escritórios e das garagens. Inicialmente, a melhor alternativa técnica para o projeto destes pilares pareceu ser o uso de concreto classe C 80, mas, dificuldades relativas ao cronograma da obra, impuseram limitações severas aos tempos para os estudos dos traços de concreto desta classe por parte da fornecedora de concreto. Essa informação levou à utilização da classe C 60.



Figura 6.18. Conjunto arquitetônico Evolution Towers. Fonte: Irmãos Thá S/A.

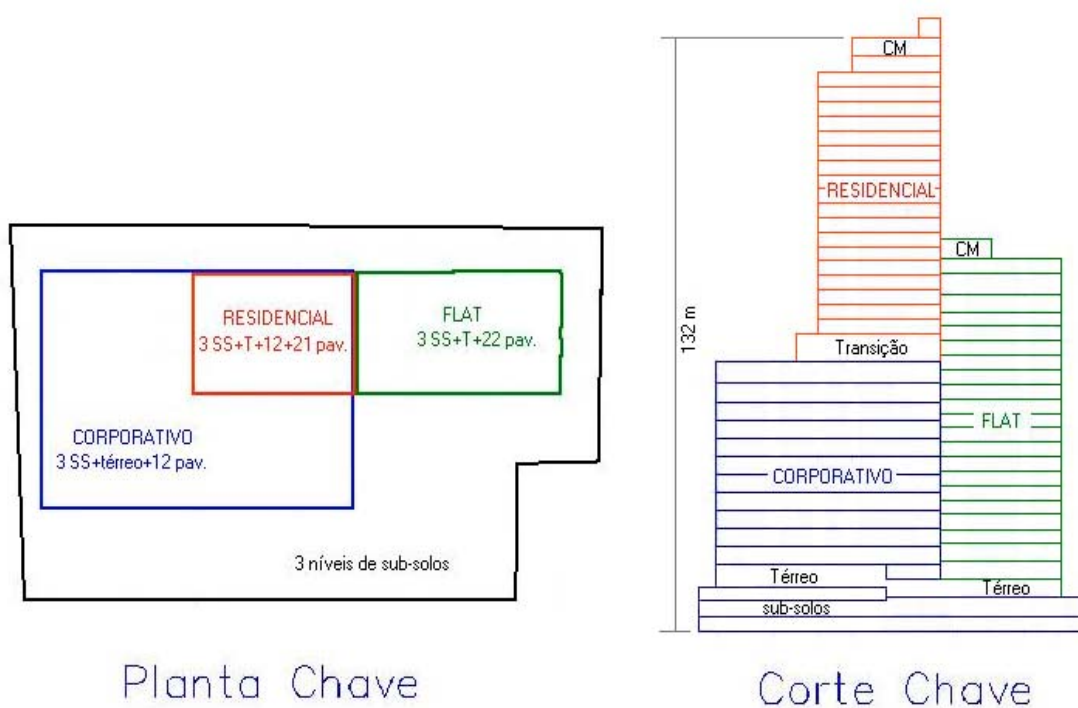


Figura 6.19. Corte e planta do Evolution Towers, com 46.210m<sup>2</sup> de área. A torre mais alta tem 37 pavimentos e 132 m de altura. Fonte Irmãos Thá S/A.





Figura 6.20. Fachada principal do Ed. Corporativo.

Tabela 6.19. Resumo dos materiais aplicados no Evolution Towers.

Fonte: Tesc Projetos Estruturais S/C Ltda.

<b>CONSUMOS DOS MATERIAIS APLICADOS</b>	
Consumos de concretos:	C 20 –1.690 m <sup>3</sup>
	C 25 –1.600 m <sup>3</sup>
	C 30 –7.966 m <sup>3</sup>
	C 40 –1.770 m <sup>3</sup>
	C 60 –1.008 m <sup>3</sup>
Consumo de formas:	84.000 m <sup>2</sup>
Consumo de aços CA 50 / CA 60:	1.047.000 kg
Consumo de aços CP 190 RB	72.000 kg

### 6.5.1 DESCRIÇÃO DAS FUNDAÇÕES E DA ESTRUTURA

Sustentando os edificios existem vários blocos sobre estacas escavadas com lama bentonítica. Um dos blocos está sob uma carga total, aproximada, de 80.000 kN.



Os blocos que suportam os pilares em concreto da classe C 60, foram projetados para serem preenchidos em duas camadas de concretos diferentes: a parte superior correspondente às esperas da armadura dos pilares com C 60 e o restante inferior com C 30. A concretagem da camada em C 60 é mostrada na Figura 6.21.

Para a estrutura do conjunto arquitetônico foram feitas considerações diferentes para cada torre. Nos edifícios do Flat e do Residencial, optou-se por utilizar uma solução convencional para as estruturas, com lajes maciças, aplicando-se nestas torres concretos das classes C 30 e C 20. Para a torre do Corporativo, devido as suas características especiais, se optou por utilizar lajes nervuradas planas protendidas (vãos de 12,5 m com 40 cm de espessura) e pilares em CAR, conforme é visível nas Figuras 6.22 a 6.25.

A opção de se limitar o uso de CAR aos pilares deve-se ao elevado custo desse material. Análises de custo benefício em parceria com a fornecedora de concreto levaram à escolha da classe C 60.



Figura 6.21. Concretagem da camada em C 60 de um bloco ao lado de outro, sob procedimento de cura. Fonte: CONCREBRAS, Eng. Jorge Christófolli.

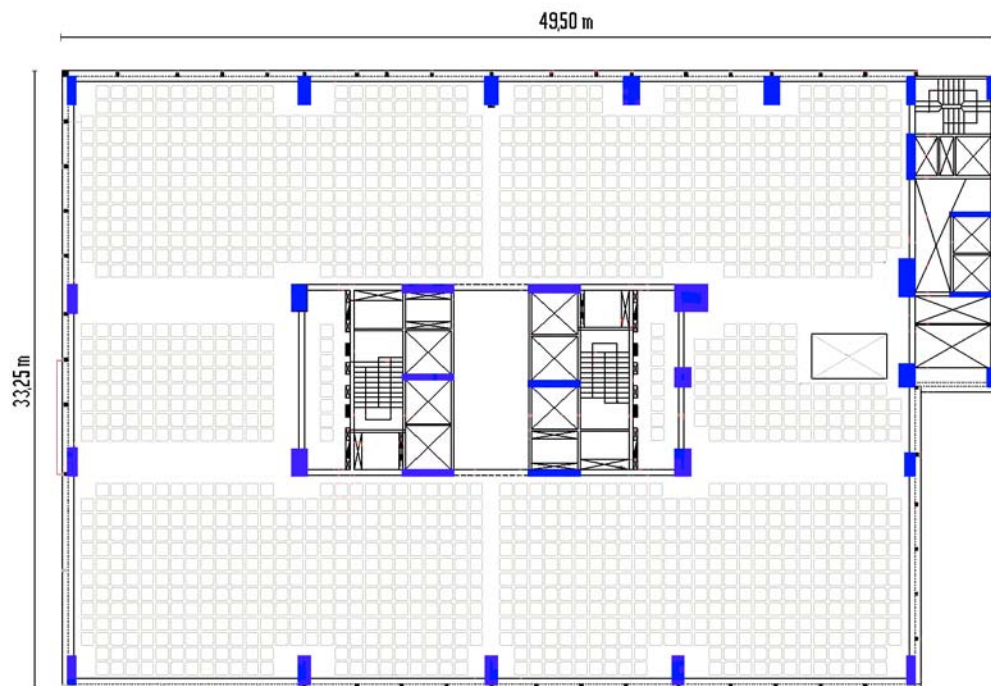


Figura 6.22. Planta do edificio Corporativo.  
 Fonte: Tesc Consultoria e Projetos Estruturais S/C Ltda.

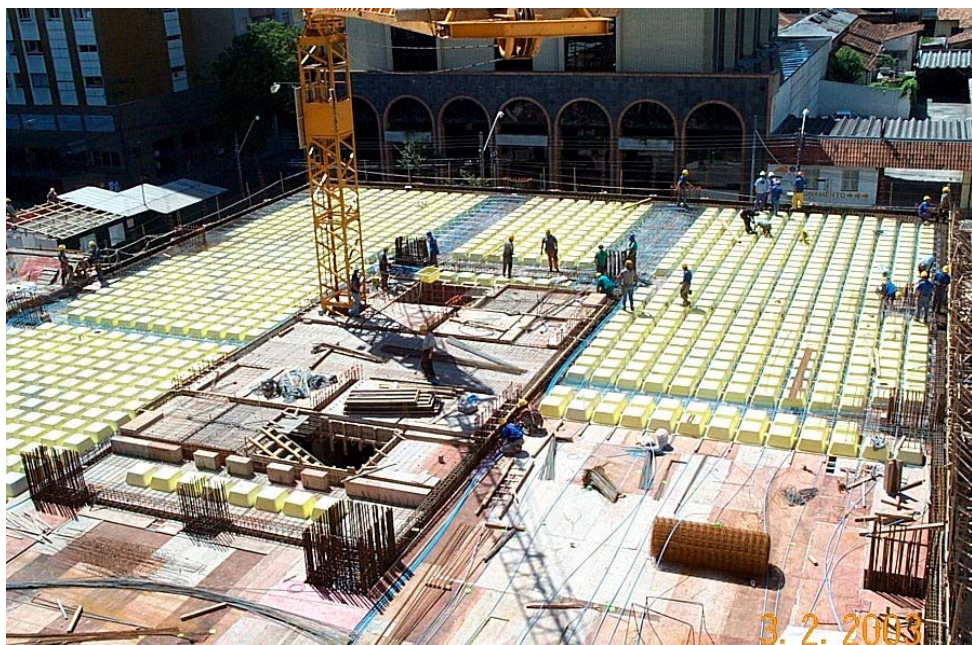


Figura 6.23. Pavimento tipo do Corporativo, mostrando as lajes nervuradas e as esperas dos pilares em CAR. Fonte: Eng. Moacir Hissayassu Inoue.





Figura 6.24. Visão da estrutura do Corporativo com pilares em CAR.

Fonte: Eng. Moacir Hissayassu Inoue.



Figura 6.25. Estrutura do Corporativo, sendo bem visível a junção do CAR com o concreto convencional. Fonte: Eng. Moacir Hissayassu Inoue.

No topo do edifício Corporativo, nasce o edifício Residencial, (totalizando 37 pavimentos). Neste nível, fez-se necessário um pavimento de transição das cargas provenientes dos pilares do residencial para os pilares do Corporativo.

Para este pavimento foram projetadas diversas vigas de transição, sendo que a mais importante tem um vão de 12,5 m com uma seção de (2,5 x 2,8) m, com momento fletor de 25.000 kNm e uma força cortante de 13.000 kN. Nesse pavimento de transição foi aplicado concreto da classe C 40.

Devido ao enorme peso próprio das vigas do pavimento de transição, foi necessário desenvolver um plano especial para a sua concretagem. A solução dada consistiu no preenchimento preliminar de uma camada de um metro, correspondente ao peso de concreto que as lajes imediatamente abaixo tinham capacidade de suportar, Esta camada foi necessária para dar às vigas de transição a resistência suficiente para suportar a complementação da concretagem.

## **6.5.2 COMPARATIVO DAS ALTERNATIVAS**

As alternativas aqui apresentadas estão seguidas de um estudo comparativo de custos das possibilidades para os pilares do edifício Corporativo do Evolution Towers.

### **6.5.2.1 DESCRIÇÃO DAS ALTERNATIVAS ANALISADAS**

Com a finalidade de analisar os custos quanto ao uso de CAR no edifício Corporativo, foram desenvolvidas comparações de custos com três classes diferentes de concreto nos pilares, sendo duas em CAR. Os pilares do Corporativo foram executados integralmente em CAR da classe C 60, inclusive nos trechos dentro das lajes e vigas comuns à cabeça dos pilares.

Os estudos foram feitos para os seis primeiros pavimentos do edifício Corporativo, (área de 1.575 m<sup>2</sup> para cada um dos seis pavimentos, totalizando 9.450 m<sup>2</sup>), onde aplicou-se concreto da classe C 60. Além da solução em C 60 executada foram estudadas mais duas alternativas, uma em concreto convencional da classe C 40 e outra com CAR da classe C 80.

Para os procedimentos de cálculo dos pilares, em concreto da classe C 40, aplicou-se a NBR-6118/2003. Para os cálculos em CAR ( $f_{ck} > 50$  MPa), considerando a magnitude das cargas de compressão (5.900 tf), o pioneirismo local para esse tipo de concreto, assim como a inexperiência daqueles que o iriam preparar e aplicar na obra, por medida de precaução, induziram o projetista estrutural a confrontar os critérios das normas internacionais CEB-FIP Model Code (1990), Eurocode EC 2, (1995), Norges Standardiseringsforbund NS-3473, (1992) e Canadian Standards Association CSA-A233-94, (1994), mostrados na Tabela 6.20, em especial, observando o seguintes itens:

- o diagrama tensão/deformação tende ao diagrama triangular;
- o encurtamento específico inferior nos CAR comparando com os concretos convencionais vibrados;
- o efeito da fluência, considerado fixo em 0,85 pela NBR-6118, foi considerado variável de acordo com a resistência característica à compressão dos concretos.

Tabela 6.20. Parâmetros de cálculo segundo algumas normas internacionais.

<b>Norma</b>	<b>CEB-FIP MC-90</b>			<b>EC-2</b>		<b>NS 3473E/92</b>			<b>CSA233/94</b>		
<b>Classe</b>	<b>C40</b>	<b>C60</b>	<b>C80</b>	<b>C40</b>	<b>C60</b>	<b>C40</b>	<b>C60</b>	<b>C80</b>	<b>C40</b>	<b>C60</b>	<b>C80</b>
$\alpha$	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,78	0,71	0,67	0,79	0,76	0,73
$\gamma_x$	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,65	1,65	1,65
$\epsilon_{co}(\text{‰})$	2	2	2	2	2	2	2,07	2,11	2	2	2
$\epsilon_{cu}(\text{‰})$	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,2	2,85	3,5	3,5	3,5
$\alpha$ – coeficiente multiplicador da tensão de cálculo que contempla o efeito Rüsche e o acréscimo de carga com a idade do concreto; $\gamma_x$ - coeficiente de minoração da resistência do concreto; $\epsilon_{co}(\text{‰})$ - o encurtamento específico do concreto no ponto de transição da parábola/ constante; $\epsilon_{cu}(\text{‰})$ – o encurtamento específico do concreto na fibra mais comprimida.											

Salienta-se que foram descontadas das seções transversais dos pilares as áreas relativas às aberturas ocupadas pelos cabos de protensão das lajes.

Para o dimensionamento dos pilares do Evolution Corporate, foram utilizados os programas para computador, CONDE 3 e ESBELT, ambos desenvolvidos pelo prof. Lauro Modesto dos Santos e o programa de flexão composta desenvolvido na empresa TESC Consultoria e Projetos Estruturais S/S Ltda.

Partindo do projeto inicial do edifício Corporativo, dimensionou-se os pilares para os concretos das classes C 40 e C 80, seguindo as seguintes diretrizes preliminares:

- para a alternativa estudada em C 40, assim como no executado em C 60, não foram alteradas as seções dos pilares ao longo dos pavimentos, para se obter um melhor aproveitamento das formas e se obter uma melhor plástica arquitetônica. Assim obteve-se uma redução das armaduras até o mínimo previsto em norma;
- no estudo com concreto da classe C 80 reduziu-se gradualmente as seções dos pilares conforme o aumento da altura do edifício.

Atendendo as determinações anteriormente colocadas para os procedimentos de cálculo, foram dimensionados os pilares para os concretos das classes C 40 e C 80, que comparados com a solução executada em concreto C 60 adotada, possibilitou montar a Tabela 6.21 mostrada a seguir, com as características principais de cada uma das soluções.

Tabela 6.21. Resumo dos quantitativos para cada uma das três alternativas.

<b>Concreto</b>	<b>CLASSE</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Formas (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Aço (kg)</b>	<b>Taxa %/m<sup>2</sup></b>
Convencional	40	675	3.404	90.292	9,55
CAR	60	675	3.404	54.932	5,81
CAR	80	567	3.192	57.320	6,07

Analisando os resultados obtidos pelos cálculos, a partir das definições iniciais, assim como os resultados da Tabela 6.21 com as características obtidas para cada uma das soluções, observou-se:

- para a solução aplicada em concreto C 60, contra o estudo em concreto C 40, obteve-se consideráveis reduções no consumo de aço e taxas das armaduras;
- a solução com concreto da classe C 80, implicou na redução das seções dos pilares, com a conseqüente redução do volume de concreto, sem, no entanto, reduzir o consumo de aço, observando-se que neste caso em especial as taxas de consumo dos estribos foram mais intensas, para tornar o concreto mais dúctil;

- os resultados mostraram uma significativa redução dos volumes de concreto e pesos de aço aplicados com a aplicação do CAR da classe C 80, com aumento de espaços nos andares inferiores além de reduções significativas em especial de resistências maiores, além das vantagens inerentes de maior durabilidade da estrutura que este material proporciona.

#### **6.5.2.2 COMPARATIVO DOS CUSTOS DAS ALTERNATIVAS**

Com a finalidade de levantar os custos atuais para cada uma das três alternativas de pilares estudadas, orçou-se os materiais e serviços necessários, compreendendo nos valores, os custos dos materiais aplicados (aço, formas), assim como da mão-de-obra necessária para a montagem das armaduras, confecção das formas e aplicação do concreto. Quanto aos custos dos concretos, para se ter um comparativo realista, levantou-se os valores de três formas diferentes:

- a) junto a uma concreteira de Curitiba;
- b) junto a uma concreteira de São Paulo;
- c) a partir dos custos levantados nesta pesquisa.

Entendeu-se ser interessante, também, levantar os valores para a cidade de São Paulo, pois as concreteiras da região de Curitiba raramente produzem concretos com resistências características superiores a 40 MPa.

Estão apresentados na Tabela 6.22 os valores levantados junto a fornecedores de Curitiba para aço e compensados para formas, assim como com empreiteiros da mesma região, para mão de obra de confecção de estruturas de concreto armado.

As formas, previstas em compensado 18 mm plastificado com ripamento e grampos para travamento foram orçadas com seis repetições de re-uso, embora os pilares em concreto da classe C 60 sofram reduções de dimensões, entendendo que é perfeitamente viável a reutilização das mesmas para os pilares de todos os seis pavimentos do edifício Corporativo.

Tabela 6.22. Custos unitários dos aços, forma e serviços (maio/2005).

<b>CUSTOS DOS AÇOS, FORMA E SERVIÇOS</b>	
Aço CA-50/CA-60	R\$ 2,27/kg
Formas em compensado 18 mm plastificado	R\$ 42,50/m <sup>2</sup>
Custo p/ transporte concreto até as lajes	R\$ 9,00/m <sup>3</sup>
M.O. para montagem das armaduras	R\$ 0,85/kg
M.O. para montagem das formas e aplicação do concreto	R\$ 20,00/m <sup>2</sup>

Os serviços orçados incluem a montagem das armaduras, a montagem das formas, o transporte do concreto por grua entre o caminhão betoneira e o nível das lajes assim como a colocação e adensamento do concreto nas formas.

A partir dos quantitativos relacionados na Tabela 6.21, assim como os valores orçados e mostrados na Tabela 6.22, totalizou-se os custos antes dos concretos para as três alternativas de pilares, apresentando-se os totais na Tabela 6.23.

Tabela 6.23. Serviços, formas e aços para as alternativas.

<b>Solução</b>	<b>Serviços R\$</b>	<b>Formas R\$</b>	<b>Aço R\$</b>	<b>TOTAIS R\$</b>
Em C 40	96.323,20	24.111,67	204.962,84	325.397,71
Em CAR C 60	66.267,20	24.111,67	124.695,64	215.074,51
Em CAR C 80	65.165,00	22.610,00	130.116,40	217.891,40

Relativos aos concretos orçados diretamente nas concreteiras, além dos preços, as empresas forneceram algumas informações relevantes para esta análise. A concreteira de Curitiba informou para os seus concretos que:

- o aditivo utilizado é de terceira geração;
- nos concretos das classes C 40 e C 60 não utilizam sílica ativa, aplicam-na somente nos C 80;
- os desvios padrões utilizados tem valores próximos a 3,5 MPa para os C 40, 5,5 MPa para os C 60 e 7,4 MPa para os C 80.

A concreteira para fornecimento em São Paulo informou também que:

- o aditivo utilizado também é de terceira geração;
- para os concretos da classe C 40 não utilizam sílica ativa, aplicam-na nos concretos C 60 e C 80;



- para concretos com resistência característica superior a 35 MPa, utilizam o valor de 5,4 para o desvio padrão.

Os valores para os concretos calculados a partir dos custos produzidos nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 6.24, a partir das condições relatadas a seguir:

- os custos foram obtidos pela da interpolação por meio da equação exponencial ajustada para os valores dos concretos produzidos pelo método *Mehta/Aïtcin*. Para o concreto de 40 MPa foi necessário fazer uma extrapolação, pois a menor resistência de dosagem para o método *Mehta/Aïtcin* obtida foi de 58,0 MPa;
- a resistência característica ( $f_{ck}$ ) foi calculada usando-se os mesmos desvios padrão ( $S_d$ ) aplicados pela central de concreto que orçou os preços para Curitiba;
- os custos operacionais da central de concreto computados foram os mesmos usados pela empresa de São Paulo, R\$ 30,00 por metro cúbico;
- foi estimado um lucro para a empresa concreteira de 10% antes dos impostos.
- foram computados impostos de 6,5% sobre o valor final.

Tabela 6.24. Custos dos concretos a partir desta pesquisa.

<b>Concretos</b>	<b>Materiais</b>	<b>Impostos</b>	<b>Operação</b>	<b>Lucro</b>	<b>TOTAL R\$/m<sup>3</sup></b>
CAR C 40	R\$ 161,06	R\$ 13,66	R\$ 30,00	R\$ 49,11	<b>R\$ 223,83</b>
CAR C 60	R\$ 247,27	R\$ 9,83	R\$ 30,00	R\$ 57,73	<b>R\$ 324,83</b>
CAR C 80	R\$ 378,48	R\$ 29,21	R\$ 30,00	R\$ 70,85	<b>R\$ 478,54</b>

Os valores orçados para os concretos direto das concreteiras e dos concretos a partir desta pesquisa, estão a seguir apresentados na Tabela 6.25.

A partir dos quantitativos relacionados na Tabela 6.21, dos custos dos concretos da Tabela 6.24, assim como os valores orçados e mostrados na Tabela 6.23, totalizou-se os custos para as três alternativas de pilares com os valores dos concretos apurados das três formas diferentes, apresentando-se os totais na Tabela 6.26.

Tabela 6.25. Valores levantados para as três alternativas.

<b>Alternativa</b>	<b>Concreto</b>	<b>Valores por m<sup>3</sup></b>
a) Central em Curitiba	C 40 convencional	<b>R\$ 232,00</b>
	CAR C 60	<b>R\$ 354,00</b>
	CAR C 80	<b>R\$ 558,00</b>
b) Central Em São Paulo	C 40 convencional	<b>R\$ 188,00</b>
	CAR C 60	<b>R\$ 319,00</b>
	CAR C 80	<b>R\$ 419,00</b>
c) Custos Por esta Pesquisa	CAR C 40	<b>R\$ 223,83</b>
	CAR C 60	<b>R\$ 324,83</b>
	CAR C 80	<b>R\$ 478,54</b>

Tabela 6.26. Resumo dos custos dos pilares para as alternativas; as soluções com valores menores estão salientadas em negrito.

<b>Alternativa</b>	<b>Concreto R\$</b>	<b>Serviços R\$</b>	<b>Formas R\$</b>	<b>Aços R\$</b>	<b>TOTAIS R\$</b>
a) Central C 40 conv. Em CAR C 60 Curitiba CAR C 80	156.600	96.323	24.111	204.962	481.997
	238.950	66.267	24.111	124.695	<b>454.024</b>
	316.386	65.165	22.610	130.116	534.277
b) Central C 40 conv. em São CAR C 60 Paulo CAR C 80	126.900	96.323	24.111	204.962	452.297
	215.325	66.267	24.111	124.695	<b>430.399</b>
	237.573	65.165	22.610	130.116	455.464
c) Custos CAR C 40 Por esta CAR C 60 Pesquisa CAR C 80	157.157	96.323	24.111	204.962	474.326
	225.331	66.267	24.111	124.695	<b>432.178</b>
	276.435	65.165	22.610	130.116	488.523

### 6.5.3 CONCLUSÕES DO ESTUDO DE CASO

Inicialmente, analisando os valores unitários, apresentados na Tabela 6.25 e as informações complementares levantadas, tudo relativo às três formas utilizadas para o levantamento, pode-se concluir que:

- existem diferenças regionais significativas dos valores do metro cúbico de CAR, geradas pelos custos locais dos materiais e também pelos desvios padrões alcançados;

- existe uma tendência muito forte para a aplicação de aditivos superplastificantes de terceira geração e do uso de sílica ativa para a obtenção de concretos com altas resistências;
- o uso da sílica ativa e/ou o maior consumo de aditivo superplastificante nos concretos da classe C 80, provocou um grande crescimento dos preços entre as classes C 60 e C 80;

Quanto à análise das três soluções estruturais para os pilares do Corporate, com concretos das classes C 40, C 60 e C 80, a partir da Tabela 6.26, com os valores totais das alternativas, pode-se concluir que:

- um dos fatores que influenciam fortemente as alternativas de projeto estrutural e a viabilidade financeira da aplicação dos CAR é o custo unitário do aço para concreto armado, salientando que, no momento desta pesquisa, baseando-se no histórico dos valores de venda das siderúrgicas, esses materiais se encontram atualmente altos;
- em todas as hipóteses a solução com CAR da classe C 60 otimizou o custo da estrutura em relação ao uso de concreto convencional da classe C 40;
- com os preços levantados, tanto por esta pesquisa, como pelos fornecidos pelas concreteiras, a solução atualmente mais viável economicamente, seria com concreto da classe C 60.

Assim, pode-se concluir que embora não de imediato, mas para obras futuras, em situações similares ao caso dos pilares do Corporate, poderia vir a ser viável a solução para os pilares em CAR da classe C 80. Essa afirmação pode ser feita imaginando uma futura redução dos preços dos concretos da classe C 80, devido a uma redução nos custos dos aditivos superplastificantes de terceira geração, assim como a produção e uso em maior quantidade de CAR na região de Curitiba. É importante, ainda, lembrar que nesta análise não foram computados os ganhos em área livre devido à redução de dimensões dos pilares, assim como também não se considerou a maior durabilidade que a estrutura terá com o uso do concreto classe C 80.

## 7 CONCLUSÕES

Por meio da análise do estudo de caso percebe-se que a aplicação de CAR pode vir a contribuir para a otimização dos custos e melhoria de qualidade de algumas das obras executadas na região metropolitana de Curitiba.

O estudo comparativo entre os métodos de dosagem com os materiais da região metropolitana de Curitiba utilizados na pesquisa, revela que a situação é complexa. Para a faixa de resistências à compressão estudada, com o método *Aïtcin* produziu-se concretos com menores consumos de cimento, fato que indica um potencial futuro para este método, salientando-se que concretos com altos consumos de cimento, acima dos 500 kg/m<sup>3</sup>, são problemáticos devido ao elevado calor de hidratação liberado e a grande retração autógena, (ACI 363R-92, 2001). O método *Aïtcin* deverá, no futuro, produzir CAR com custos mais baixos, devido a uma provável redução dos custos dos aditivos à base éter carboxílico modificado. Fazendo-se a análise atual quanto aos custos, embora o método *Mehta/Aïtcin* não tenha gerado concretos com os menores consumos de cimento, foi este método que, com os custos dos materiais que compõe os CAR, em especial o aditivo superplastificante, produziu concretos mais baratos.

### 7.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir das dúvidas e dificuldades sobre a tecnologia dos CAR observadas durante o andamento desta pesquisa, sugere-se alguns assuntos a serem investigados em futuras pesquisas:

- estudos sobre as técnicas para a regularização dos topos dos corpo-de-prova para CAR;
- avaliações sobre as propriedades relacionadas à durabilidade e a retração de concretos com altos consumos de cimento;
- avaliações sobre a perda de abatimento no tempo em CAR com aditivos superplastificantes de segunda e terceira gerações;

- estudos para a otimização do método *Aïtcin*, quanto a relação entre os consumos de água e superplastificante para CAR com o uso de materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba;
- avaliação do impacto técnico e financeiro das redosagens de aditivos superplastificantes sobre os CAR.

## Referências Bibliográficas

1. AİTCIN, P.-C. **Concreto de Alto Desempenho**, tradução de Geraldo G. Serra – São Paulo – Editora Pini, 2000
2. AİTCIN, P.-C., ADAM, **120 MPa sem mistério**, revista *Téchne*, nov./dez. 1995. São Paulo, PINI. 5p.
3. ALMEIDA, I. R., **Concretos de Alto Desempenho. A Evolução Tecnológica dos Concretos Tradicionais**, *ANAIS DO 1º SEMINÁRIO FLUMINENSE DE ENGENHARIA*, Editados pela Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, Niterói (RJ), novembro de 1992, p. 113-116.
4. ALMEIDA, I.R **Estudos e Pesquisas sobre concreto de alto desempenho realizados no Brasil**. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES, 1st., 1996, Florianópolis. Proceedings... Florianópolis, SC, Jun 1996. p.82-93.
5. ALVES, M. F. **Estudo comparativo de métodos de dosagem para concreto de alta resistência**. Dissertação de mestrado, UFRGS-PPGEC, 2000. 140 p.
6. ALVES, M. F; CREMONINI, R. A., DAL MOLIN, D.C.; **A comparison of mix proportioning methods for high-strength concrete**, *Cement & Concrete Composites*, 2003.
7. AMARAL, E. M. FILHO, **Concreto de Alta Resistência**, Curso sobre Concreto de Alta resistência – ABCP – 1993.
8. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 209R-92 (Reapproved 1997). **Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures**. ACI 'Manual of Practice 2001. ACI, Detroit (USA), 2001. 47 p.
9. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 211.1-91 (Reapproved 1997). **Standard practice for selecting proportions for normal, heavy-weight, and mass concrete**. ACI Manual of Concrete Practice 2001. ACI, Detroit (USA), 2001. 38 p.
10. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 212.4R-93 (Reapproved 1998), **Guide for the Use of High-Range Water-Reducing Admixtures (Superplasticizers) in Concrete**. ACI Manual of Practice 2001. ACI, Detroit (USA), 2001. 10 p.

11. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 234R-96. **Guide for the use of silica fume in concrete**. ACI Manual of Concrete Practice 2001. ACI, Detroit (USA), 2001. 51 p.
12. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318R-99. **Building code for structural concrete**. ACI Manual of Concrete Practice 2001. ACI, Detroit (USA), 2001. 392 p.
13. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 363R-92 (Reapproved 1997) **State-of-the-art report on highstrength concrete**. ACI Manual of Concrete Practice 2001. ACI, Detroit (USA), 2001. 55 p.
14. ARAUJO, F. E.; GOMES, V.; WEBER, S. L.; PRUDÊNCIO Jr, L. R., **Influência da seqüência de mistura dos materiais na betoneira na resistência do concreto de alto desempenho**, Ibracon, 2001. 15p.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 3435: **Cimento Portland - determinação da expansibilidade de Le Chatelier**. Rio de Janeiro, 1991.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: **Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991.
17. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.
18. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto- Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.
19. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5748: **Cimento Portland – análise química – Determinação de óxido de cálcio livre**. Rio de Janeiro, 1993.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2003.
21. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6465: **Agregados -determinação da abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro, 1984.
22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto**. Rio de Janeiro, 1983.
23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland – determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

24. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7218: **Agregados -determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro, 1987.
25. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7219: **Agregados -determinação do teor de materiais pulverulentos**. Rio de Janeiro, 1987.
26. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7251: **Agregado em estado solto - determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, 1982.
27. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7682: **Calda de cimento para injeção - determinação do índice de fluidez**. Rio de Janeiro, 1983.
28. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809: **Agregado graúdo - determinação do índice de forma pelo método do paquímetro**. Rio de Janeiro, 1982.
29. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7810: **Agregado em estado compactado e seco - determinação da massa unitária**. Rio de Janeiro, 1983.
30. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: **Concretos para fins estruturais - classificação por grupos de resistência**. Rio de Janeiro, 1992.
31. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776: **Agregados -determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman**. Rio de Janeiro, 1987.
32. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9777: **Agregados -determinação da absorção de água em agregados miúdos**. Rio de Janeiro, 1987.
33. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: **Concreto fresco -determinação da massa específica e teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 1987.
34. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9937: **Agregados -determinação da absorção e da massa específica para agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1987.
35. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: **Cimento Portland - determinação da finura por meio da peneira 75 micrometros (número 200)**. Rio de Janeiro, 1991.



36. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12654: **Controle tecnológico de materiais componentes do concreto**. Rio de Janeiro, 1992.
37. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13957: **Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 1997.
38. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-15: **Cimento Portland – análise química – Determinação de resíduo insolúvel**. Rio de Janeiro, 2004.
39. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-18: **Cimento Portland – análise química – Determinação da perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 2004.
40. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-21: **Cimento Portland – análise química – Método optativo para a determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio**. Rio de Janeiro, 2004.
41. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-43: **Cimento Portland - determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2002.
42. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-65: **Cimento Portland - determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro, 2002.
43. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-67: **Concreto fresco -determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.
44. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-76: **Cimento Portland - determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro, 1998.
45. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM-248: **Agregados – determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
46. BHARATKUMAR, B. H.; NARAYANAN, R.; RAGHUPRASAD, B. K.; RAMACHANDRAMURTHY, D. S., **Mix proportioning of high performance concrete**, Cement & Concrete Composites, 23, Elsevier Science Ltd., 2001. p 71-80.
47. BAUER, R. J. F., TAKASHIMA, S., MELO, C. E. S.; **Propriedades Mecânicas do Concreto de Ultra-resistência**, Ibracon, 2004.

48. CARRASQUILLO P. M.; CARRASQUILLO R. L., **Evaluation of the use of current concrete practice in the production of high-strength concrete**, ACI Materials Journal, January/February, 1988. 5p.
49. CARNEIRO, A. M. P.; RÉGIS, P.; AGRICIO, N. M. F.; OLIVEIRA, J. F.; SILVA, A.; RODRÍGUES, P. C., **Análise da Influência da Adição de Sílica Ativa nas Curvas de Resistência à Compressão de Concretos Produzidos com Agregado Natural e Agregado com Curva de Distribuição Granulométrica Otimizada**, Ibracon, 2004.
50. CEB/FIP Model Code 1990 – Bulletin d’information No. 203, 204 e 205, 1990.
51. CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, CSA-A233-94, **Design of Concrete Structures**, Dec 1994.
52. CREMONINI, R. A.; DAL MOLIN, D.C.C.; CECCATO, D. M.; MANCIO M.; GOULART, J., **Desenvolvimento de um Método de Dosagem de Concretos de Alta Resistência com Baixo Consumo de Cimento**, IBRACON, 2001.
53. DAL MOLIN, D. C., **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. Tese de doutorado, DCC/EPUSP, 1995. 286 p.
54. DAL MOLIN, D. C.; VIEIRA, F.M.P.; WOLF, J., **Concreto de Alta Resistência**. CD-ROM: Concreto de Alto Desempenho, Versão 1.0. Produzido por NUTAU/USP.1997.
55. DOMONE, P.; SOUTSOS, M.; **An Approach to the Proportioning of High-Strength Concrete Mixes**. Concrete International. v. 16, n. 10, 1994. p. 26 a 31.
56. ENGEMIX, **Durabilidade do Concreto**, material publicitário, 2004.
57. ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO, Revista, Curitiba, Ed. Luso Brasileira Ltda., n. 78, março 2003.
58. ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO, Revista, Curitiba, Ed. Luso Brasileira Ltda., n. 94, junho 2004.
59. EUROCODE, EC-2, **Design of Concrete Structures**, 1995.
60. FERREIRA, M. M. F.; FONTE, A. O. C. F.; ATHAIDE, A. C. N., **Estudo Comparativo entre a Utilização de Concretos Convencionais e de Alto Desempenho em Estruturas de Edifícios Altos**, Ibracon, 2001.16p.
61. GARZON, L. **Las Torres Petronas – Los edificios mas altos del mundo alcanzan los 451.9 metros sobre Kuala Lumpur**, In: II Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais, Sobral-CE, setembro de 2004. 26p.

62. GIACCIO, G.; ZERBINO, R., **Failure mechanism of concrete. Combined effects of coarse aggregates and strength level**, Advanced Cement Based Materials, 7, Elsevier Science Ltd, 1998. p 41-48.
63. GUTIÉRRES, P. A.; CÁNOVAS, M. F., **High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning**, ACI Materials Journal, may-june, 1996. 9p.
64. HARTMAN, C. T.; HELENE, P. R. L., **Pilares com 125 MPa: Recorde Mundial em Concreto de Alto Desempenho Colorido**, 2004.
65. HELENE, P. R. L., **Concreto de elevado desempenho – O material para construção das obras nos anos 2000**, CD-ROM Concreto de Alto Desempenho, Versão 1.0. Produzido por NUTAU/USP. 1997a.
66. HELENE, P. R. L. **Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto**. In: Anais do Workshop: Durabilidade das Construções, ANTAC, julho de 1997b. 31-42p.
67. HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto** - São Paulo – Editora Pini-1992. 349p.
68. KAKIZAKI, M.; EDAHIRO, H.; TOCHIGI, T.; NIKI, T., **Effect of mixing method on mechanical properties and pore structure of ultra high-strength concrete**, 1992 Istanbul Conference. 19p.
69. KANTRO, D. L., **Influence of water-reducing admixtures on properties of cement-paste – A miniature slump test**, Cement, Concrete and Aggregates. V. 2, n. 2, 1980. p. 95-102.
70. LIBÓRIO, J. **Concreto de Alto Desempenho – Uma Tecnologia Simples para Produção de Estruturas Duráveis**, in: II Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais, Sobral-CE, setembro de 2004. 42p.
71. De LARRARD, F., **A Method for Proportioning High-Strength Concrete Mixtures**. Cement, Concrete and Aggregates. V. 12, n. 2, 1990. p. 47-52.
72. De LARRARD, F.; SEDRAN, T.; , **Mixture-proportioning of high-performance concrete**, Cement and Concrete Research 32, 2002. 6 p.
73. MALHOTRA, V. M., **Aplicações inovadoras de superplastificantes para produção de concreto de alto desempenho**, revista Técnica set/out. 1998. São Paulo, PINI. 8p.
74. MARTINS, I. R. F.; BARBOSA M. P.; LAZARI r.; SALLES F. M., **Otimização dos materiais para a composição do concreto de alto desempenho**, Ibracon. 2004. 15p.

75. MENDES, S. E. da S. M., **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**, Dissertação de Mestrado, ST/PPEC/UFPR, 2002, 146 p.
76. MEHTA, P.K. **Advancements in Concrete Technology**. Concrete International, v. 21, n.6, jun.1999. p. 69-76.
77. MEHTA, P.K; AİTCIN, P-C., **Microstructural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High Strenght Concrete**. In: HSC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION ON HIGH STRENGHT CONCRETE, 2, Berkeley, (CA). ACI SP-121. Berkeley, (CA): W.T.Hester, 1990a. p. 265-286.
78. MEHTA, P.K; AİTCIN, P-C., **Principles Underlying Production for High Strenght Performance Concrete**. Cement, Concrete & Aggregates v. 12, n.2, p. 70-78. 1990b.
79. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto, estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.
80. MENEGHETTI, L. C.; GAVA, G. P.; DALCANAL, P. R., **Avaliação de diferentes materiais para capeamento de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**, Ibracon 2001. 8p.
81. NAWY, E.G., **Fundamentals of High Strenght High Performance Concrete**. London: Longman Group Limited, 1996. 340p.
82. NEVILLE, A. M. , **Propriedades do Concreto**, São Paulo – Editora Pini- 1997. 828p.
83. NOGUEIRA, J.R e outros, **Relatórios Técnicos I, II, III e IV – Estudo da Tecnologia e Aplicação de Concreto de Alto Desempenho**, LAME / CESEC / POLIMIX S.A. / VOTORAN / SIKA S.A. 1998.
84. NOGUEIRA, J.R; **Análise das propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho, com utilização de materiais de região de Curitiba**, Monografia de Especialização, CESEC, 2000.
85. Norges Standardiseringsforbund NS 3473, E:1992, **Concrete Structure Design Rules**.
86. O'REILLY DIAZ, V., **Método de Dosagem de Concreto de Elevado Desempenho**. São Paulo, Editora Pini, 1998
87. **Partner of the World – Germany**. Special Asia Edition. 1996/97.
88. PETRUCCI, E., **Concreto de cimento Portland**, Ed. Globo, Porto Alegre, 1971.
89. PING, K. C. e YAW, N. P, **Influence of mixing techniques on properties of high performance concrete**, Cement and Concrete Research v.31, 2001. 9p.

90. PINHO, J. R. S., DIAS, U. S. Jr., POMPEU B. B. N., BARATA, M., **Comparação de dois métodos de dosagem de CAD para materiais da região de Belém**, Ibracon, 2004.
91. PINTO, R. O.; GEYER, A. L. B.; LOPES, A. N. M. L. , **Aplicação dos Métodos de Dosagem Específicos para Concretos de Alto Desempenho (CAD)**, Ibracon, 2003. 16p.
92. PUNKKI, J.; GÖLASZEWSKI, J.; GJØRV, O. E.; **Workability loss of high-strength concrete**, ACI Materials Journal, september-october, 1996. 5p.
93. ROJAS, A. M. T. e PINTO R. C. A; **Comparação entre critérios de normas internacionais aplicáveis ao concreto de alto desempenho**, Ibracon, 2004. 12p.
94. SERRA, G. G., **Concreto de Alto Desempenho e a Nova Arquitetura**, Universidade de São Paulo, CD-ROM: Concreto de Alto Desempenho, Versão 1.0. Produzido por NUTAU/USP.1997.
95. SILVA E. F.; VASCONCELOS P. H. C. O., **Efeito do tipo de superplastificante e sua dosagem na fluidez de pastas de cimento para concreto de alto desempenho**, Ibracon, 2002. 13p.
96. STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – SHRP - National Research Council, **A State-of-Art Report (1989-1994)**, SHRP C 205, North Carolina State University, 1996. 69p.
97. TAYLOR, M.R.; LYNDON, F. D.; BARR, B. I. G., **Mix proportions for high strength concrete**, *Construction and Building Materials*, Vol 10, Nº 6, 1996. p 445-450.
98. TORALLES CARBONARI, B. M., **Estúdio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de altas prestaciones**. Barcelona, 1996, 174p. Tese (doutorado) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
99. TORALLES CARBONARI, B. M.; MOREIRA, E. M. S.; WITTMANN R.; CARBONARI, G., **Estudo comparativo do desempenho de pastas utilizando o cone de Marsh e viscosímetro**, Ibracon, 2003. 13p.